BIBLIOTHÈQUE DE L'INGÉNIEUR-ÉLE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DE L. BARBILLIC

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, DIRECTEUR DE L'INSTITUT ÉI

CONSTRUCTION

DES

ALTERNATEURS

Anciens types. — Types modernes.

Types spéciaux.

PAR

P. BERGEON

Ingénieur-Electricien, Professeur à l'Institut Electrotechnique de Grenoble

ET

L. BARBILLION

Professeur à l'Université de Grenoble, Directeur de l'Institut

PARIS

ALBIN MICHEL, EDITEUR

22, RUE HUYGHENS, 22

1921

BIBLIOTHÈQUE DE L'INGÉNIEUR-ÉLECTRICIEN
Publiée sous la direction de L. BARBILLION
PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, DIRECTEUR DE L'INSTITUT ELECTROTECHNIQUE

CONSTRUCTION DES ALTERNATEURS

Anciens Types. — Types modernes

Types spéciaux.

PAR

P. BERGEON

INGÉNIEUR-ÉLECTRICIEN, PROFESSEUR A L'INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE DE GRENOBLE

ET

L. BARBILLION

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, DIRECTEUR DE L'INSTITUT

PARIS
ALBIN MICHEL, ÉDITEUR
22, RUE HUYGHENS, 22

1921

PRÉFACE

L'un des problèmes qui préoccupe le plus, et à juste titre, l'ingénieur moderne, est celui de la construction des grosses unités motrices et génératrices qui constituent l'ossature des stations centrales modernes. Depuis les premiers temps, temps héroïques de l'électricité industrielle, d'immenses progrès ont été accomplis dans cet ordre d'idées. Au début, les constructeurs redoutaient d'immobiliser des puissances trop considérables sur des unités isolées, d'abord parce que les techniques des hautes tensions et celle des hautes intensités étaient encore à faire, et ensuite parce que les conceptions relatives aux puissances d'usines étaient encore quelque peu timides. On ne craignait pas, il y a quelque trente ans, de créer de petites stations centrales de 50, 100, 200 chevaux, dont les prix d'installation étaient cependant presque prohibitifs et surtout dont le tort capital était presque toujours, en prenant position (nous parlons d'usines hydrauliques) sur un cours d'eau, en utilisant seulement les portions les plus avantageuses de ce cours d'eau, de rendre à peu près impossible l'aménagement systématique du plein débit et de la hauteur de chute totale.

Dynamos à courants continus, de tension normale égale à 100 ou 120 volts, voire de 5 à 600 pour la traction, alternateurs monophasés ou triphasés à 50 périodes, à 3.000 volts, 5.000 au maxi-

mum entre bornes, de quelques centaines de chevaux, de deux à trois mille au maximum, tel était, il y a vingt ans encore, le maigre arsenal dont disposait l'industrie électrotechnique pour l'aménagement de nos chutes, et même pour la création de stations centrales thermiques.

Depuis lors, les choses ont bien changé. D'abord les types de machines génératrices se sont unifiés. Dans le domaine des alternateurs qui nous préoccupent particulièrement ici, nous avons vu naître, puis mourir, les alternateurs à fer tournant et bien d'autres dispositifs dans le détail desquels il serait trop long d'entrer ici. Nous avons vu aussi essayer de constituer, dans le but de réduire la dépense inhérente aux transformateurs, des alternateurs à tension élevée, 15 *à* 30.000 *volts. Cette pratique, elle aussi, a ensuite disparu en raison des accidents incessants qui survenaient dans les bobinages. On a dit bien du mal du transformateur, mais qu'on lui laisse au moins un mérite, dans ce siècle sportif jusqu'à l'outrance. Le transformateur « encaisse », sans se plaindre et sans grands dommages, si l'on sait le garnir des dispositifs de sécurité suffisants, les coups de foudre les plus graves et les surtensions les plus violentes.*

L'alternateur s'est donc normalisé, *ou* standardisé, *au choix du lecteur. C'est aux principes de construction des alternateurs modernes, avec naturellement un retour sur le passé, auquel nous devons respect et reconnaissance, qu'est consacré le petit ouvrage ci-après. Les auteurs — dont les enseignements sur la matière datent, à l'Institut de Grenoble, d'une vingtaine d'années, — se sont efforcés d'y concentrer tout ce que leur expérience pratique leur a fait juger être le plus utile à l'Ingénieur électricien ou mécanicien. Aux jeunes ingénieurs débutants, sortant d'Instituts comme le nôtre, nous donnons uniformément le conseil de faire d'abord, quand ils le peuvent, avant d'entrer dans l'exploitation, un stage de six mois au moins, dans une grande usine de construction électromécanique. Une Ecole, si bien installée soit-elle, ne peut initier ses élèves à la connaissance intime de machines de plusieurs milliers de chevaux. Or, on construit maintenant des turbo-alternateurs de* 40.000 *kilowatts et, du jour au lendemain, le jeune ingénieur peut être ap-*

pelé à exploiter une usine où se trouvent de pareilles unités. Comment connaître leur vie intime, et surtout leur structure, à ces montres cuirassés, dont on ne voit rien une fois montés, si le débutant ne va pas scruter leur fonctionnement et étudier leur structure là même où ils sont établis?

Notre espoir est que ce petit livre servira de « vade mecum » et d'ouvrage de départ aux élèves d'Ecoles techniques désireux de parachever leur éducation par un stage dans la construction. Nous nous estimerons trop heureux si ce but modeste est réalisé.

P. BERGEON et L. BARBILLION.

CONSTRUCTION DES ALTERNATEURS

CHAPITRE PREMIER

CLASSIFICATION ET ETUDE DES ANCIENS TYPES D'ALTERNATEURS

GÉNÉRALITÉS

Autrefois, les types d'alternateurs étaient très nombreux et très variés, mais peu à peu les constructeurs, en abandonnant les dispositifs mauvais et les formes vicieuses, sont arrivés à adopter tous un certain nombre de dispositions qui font qu'actuellement, les alternateurs sortant des ateliers de divers pays, ne diffèrent plus entre eux que par des détails souvent sans importance.

Avant d'étudier la construction des alternateurs modernes, et pour bien comprendre les raisons qui ont poussé les constructeurs à s'arrêter tous au même type, il est bon de passer rapidement en revue les principaux modèles d'alternateurs employés autrefois. On pourra ainsi beaucoup mieux se rendre compte des conditions auxquelles les alternateurs doivent satisfaire et des dispositions que l'on doit éviter.

D'autre part, si l'on a abandonné depuis quelques années la construction des différents types d'alternateurs que l'on va décrire maintenant, il n'en existe pas moins plusieurs de ces anciens modèles encore en fonctionnement.

Tout alternateur étant composé de deux parties bien distinctes : l'induit et l'inducteur, on étudiera successivement les différentes formes qui ont été employées pour chacune de ces deux parties.

CLASSIFICATION SUIVANT LA NATURE DE L'INDUIT

On peut ranger tous les induits en trois catégories :

1° Les induits à disque;

2° Les induits à anneau;

3° Les induits en tambour.

Dans le cas du courant continu, on a d'ailleurs la même classification.

I. — Induits à disque

Les alternateurs avec induit à disque les plus connus sont : ceux de Siemens (1878), qui furent très employés en Allemagne; ceux de Ferranti (1882), en Angleterre, puis en France; ceux de Ferranti-

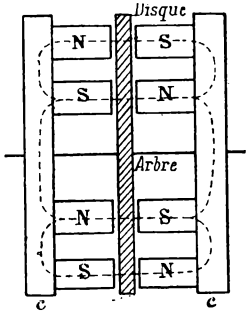


Fig. 1.

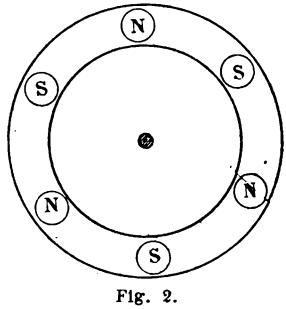


Fig. 2.

Alternateur Ferranti (Inducteur).

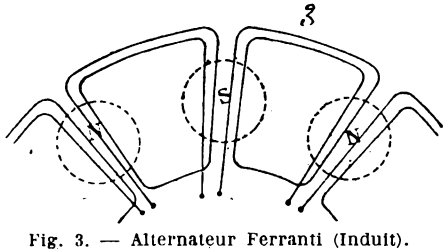


Fig. 3. — Alternateur Ferranti (Induit).

Patin, en France surtout, et ceux de Mordey (1888), qui eurent beaucoup de succès, en Angleterre principalement.

Alternateur Ferranti. — Sensiblement semblable à celui de Siemens.

Dans le modèle classique établi en 1882, l'inducteur était fixe et l'induit tournant.

Inducteur. — L'inducteur, du type hétéropolaire, était formé de deux cercles C placés en face l'un de l'autre et sur lesquels étaient fixés les noyaux polaires NS (fig. 1 et 2).

Si l'on regarde, suivant un plan perpendiculaire à l'arbre, un des cercles inducteurs après avoir enlevé l'autre cercle, on a la figure 2.

Pour simplifier, on n'a pas représenté les bobines inductrices qui entourent les noyaux polaires NS.

Les lignes de force sont figurées en pointillé.

Induit. — Entre les deux cercles tournait l'induit, formé d'un ruban de cuivre que l'on enroulait en plusieurs bobines, suivant le schéma indiqué figure 3.

Les noyaux de ces bobines étaient constitués par des lames de laiton disposées en éventail, isolées entre elles par de l'amiante et fixées à un bloc de laiton percé d'un trou, où l'on engageait un boulon servant à fixer les bobines à la carcasse de l'induit (fig. 4).

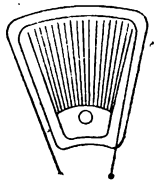


Fig. 4. — Bobine induite de l'alternateur Ferranti.

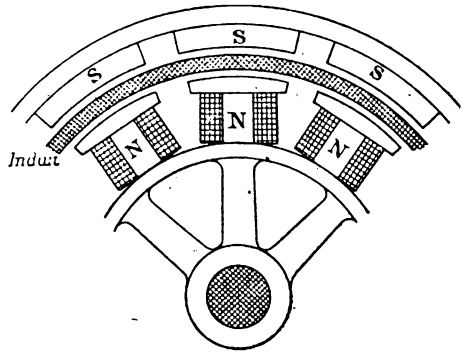


Fig. 5. — Alternateur volant Ferranti-Patin. Coupe par un plan perpendiculaire à l'arbre.

Les bobines pouvaient être montées suivant les cas en série ou en parallèle.

On remarquera que cet enroulement est semblable à un type

d'enroulement monophasé à bobines que l'on étudiera dans la suite (v. fig. 77).

Alternateur volant Ferranti-Patin. — Cet alternateur, qui a été employé dans quelques secteurs parisiens, est à induit fixe et à inducteur mobile.

L'inducteur, qui est toujours plus lourd que l'induit, convient mieux que celui-ci pour jouer le rôle de volant.

Cet inducteur, du type homopolaire, a la forme indiquée par les figures 5 et 6.

L'induit est absolument semblable à celui de l'alternateur Ferranti décrit précédemment, mais au lieu d'avoir la forme d'un disque, il a celle d'un cylindre. Malgré cela, cet induit ne dérive pas moins, comme principe, du type dont la forme ordinaire est celle d'un disque, et qui a pour caractéristique principale de n'avoir pas de fer.

Alternateur Mordey (1888). — L'induit, qui est fixe, est sem-

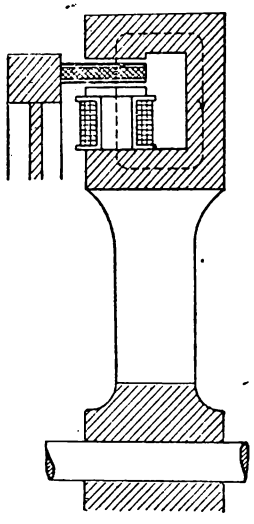


Fig. 6. — Alternateur volant Ferranti-Patin.

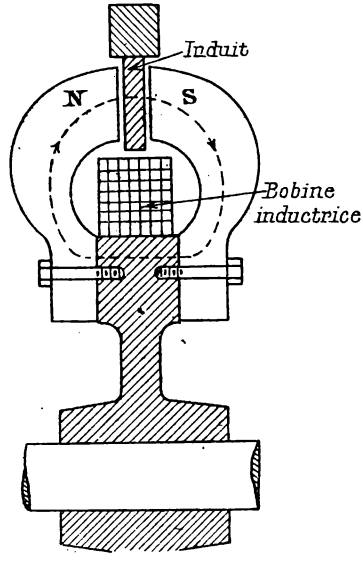


Fig. 7. — Alternateur Mordey.

blable à celui de l'alternateur Ferranti. L'inducteur, qui est homo-

polaire et n'a qu'une seule bobine d'excitation, sera décrit lorsqu'on examinera les différents types d'inducteurs (fig. 7).

Avantages et inconvénients des induits à disque. — Les induits à disque ne possédaient en général pas de fer, aussi appelait-on souvent les alternateurs que l'on vient de décrire : alternateurs à induit sans fer.

Les pertes dites *dans le fer* étaient donc nulles, ce qui était surtout avantageux dans le cas de fréquences élevées et, d'autre part, il était facile d'obtenir une force électromotrice induite bien sinusoïdale.

Par contre, à cause de la grandeur de l'entrefer, entrefer qui comprenait tout l'induit, la dépense d'excitation était assez considérable, et, d'autre part surtout, par suite de l'absence de fer, les efforts s'exerçant directement sur le cuivre de l'induit, qu'il était d'ailleurs difficile de fixer d'une façon bien rigide, on avait à craindre de fréquentes détériorations de cet enroulement induit, soit par suite

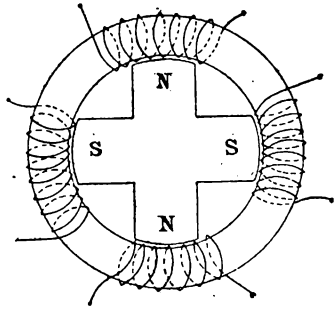


Fig. 8. — Alternateur Gramme.

de courts-circuits, soit même seulement par suite de surcharges, surtout si l'alternateur devait alimenter des moteurs donnant lieu à des à-coups. C'était là un inconvénient très grave.

II. — Induits à anneau

Vers 1878, Gramme imagina un alternateur avec induit à anneau, qui est resté célèbre.

Cet alternateur était à inducteur tournant et à induit fixe.

L'inducteur, du type hétéropolaire, était semblable en principe à celui des alternateurs modernes.

L'induit était formé d'un anneau en fil de fer ou en tôles, sur lequel était enroulé un certain nombre de spires divisées en plusieurs sections, chaque section correspondant à un pôle.

On pouvait, suivant la tension à obtenir, coupler ces sections, soit en série, soit en parallèle. On réalisait ainsi un alternateur monophasé.

Ce qui rend cet alternateur particulièrement intéressant, c'est que Gramme avait eu l'idée, pour obtenir une meilleure utilisation de l'induit, de placer sur son anneau plusieurs enroulements (quatre en général) décalés entre eux par rapport à l'inducteur, indépendants les uns des autres, et destinés à alimenter chacun un circuit de lampes distinct.

Les courants induits dans les divers enroulements n'étaient pas en phase entre eux. Ainsi, dans le cas de la figure 9, où l'on n'a figuré que deux enroulements, les courants sont décalés à 90°; on a donc des courants diphasés. Avec trois enroulements, on aurait pu avoir des courants triphasés.

L'alternateur Gramme était donc un véritable alternateur polyphasé.

L'enroulement de l'alternateur Gramme rentre dans la catégorie des enroulements *ouverts*, c'est-à-dire de ceux qui ne sont pas néces-

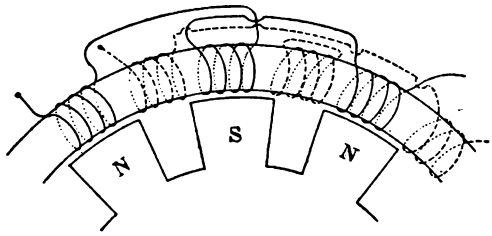


Fig. 9. — Alternateur Gramme avec circuits induits polyphasés indépendants.

sairement fermés sur eux-mêmes à l'intérieur de l'induit, comme les enroulements employés en courant continu qui doivent former plusieurs circuits en parallèle, c'est-à-dire plusieurs circuits fermés sur eux-mêmes à l'intérieur de l'induit.

On peut très bien, dans le cas de l'anneau, comme d'ailleurs pour toutes les formes de l'induit, employer les enroulements fermés. On a alors le même enroulement que celui d'une machine à courant continu à anneau, avec cette différence que le collecteur est remplacé par des bagues reliées à des prises de courant, prises faites à des endroits convenables pour permettre d'obtenir des courants monophasés ou polyphasés. Ces dispositions sont trop connues pour qu'il soit utile d'insister.

L'induit ordinaire à anneau ou à tambour, c'est-à-dire l'induit des dynamos à courant continu, mais avec des bagues remplaçant le collecteur, est surtout employé dans le cas de machines de faible puissance, car, en faisant l'inducteur fixe et l'induit mobile, on peut adjoindre un petit collecteur permettant d'obtenir très simplement le courant nécessaire à l'excitation de l'inducteur.

Avantages et inconvénients des induits à anneau. — Ce sont à peu près les mêmes que pour les dynamos à courant continu.

Avantages. — *a*) Faible différence de potentiel entre les conducteurs voisins. Cet avantage, qui était autrefois très important, n'existe plus maintenant, à cause de la meilleure qualité des isolants employés, et surtout de la disposition adoptée actuellement qui permet de maintenir très écartés les uns des autres les conducteurs entre lesquels existe une différence de potentiel un peu élevée.

b) Emploi possible de l'induit lisse, les conducteurs pouvant être maintenus beaucoup plus solidement que dans le cas du tambour.

L'induit lisse présente l'avantage de permettre la réalisation d'une force électromotrice très sinusoïdale; par contre, il nécessite une grande dépense d'excitation, et l'on a à craindre dans les conducteurs induits des courants de Foucault très considérables et des détériorations fréquentes, que l'on peut éviter avec les induits dentés.

Inconvénients. — *a*) Les conducteurs sont mal utilisés.

b) L'enroulement doit être toujours fait à la main.

c) La réaction d'induit est très forte.

En fait les induits à anneau sont aujourd'hui complètement abandonnés.

III. — Induits en tambour

Ce sont, à l'heure actuelle, les seuls employés. On les décrira en détail en étudiant la construction des alternateurs modernes.

On peut ranger dans la classe des induits en tambour une forme d'induit qui semble cependant à première vue en différer beaucoup : c'est celle des induits appelés souvent « induits polaires » dont le type le plus connu est l'induit de l'alternateur Ganz-Zypernowsky.

Alternateur Ganz-Zypernowsky à induit polaire. — L'inducteur est mobile et l'induit fixe.

L'inducteur et l'induit sont formés de tôles. Dans l'inducteur, les

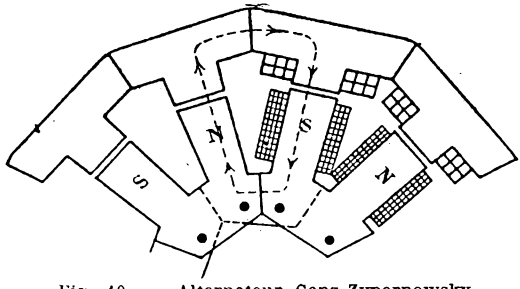


Fig. 10. — Alternateur Ganz-Zypernowsky.

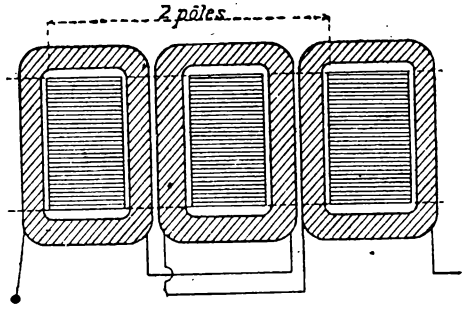


Fig. 11. — Alternateur Ganz-Zypernowsky. Développement d'un induit monophasé.

tôles sont estampées en forme de V et entrecroisées; dans l'induit, elles ont la forme d'un T (fig. 10).

Sur l'inducteur et sur l'induit sont disposées des bobines, de telle

sorte qu'il n'y a pas de différence en principe entre l'inducteur et l'induit. C'est pour cette raison qu'on appelle souvent les induits de cette forme « induits polaires ».

On peut voir facilement que cet induit est un véritable induit en tambour avec une seule dent, ou une seule encoche par pôle.

Il suffit pour cela de considérer l'induit en le représentant coupé par un plan passant par l'arbre, puis développé.

La figure 11 représente ainsi un alternateur monophasé.

Pour faire un alternateur triphasé, il faudrait avoir trois dents par paire de pôles (fig. 12); on aurait alors un bobinage avec bobines courtes.

Avantage principal de cet alternateur. — Les bobines étant séparées les unes des autres, cet alternateur se prête bien à la pro-

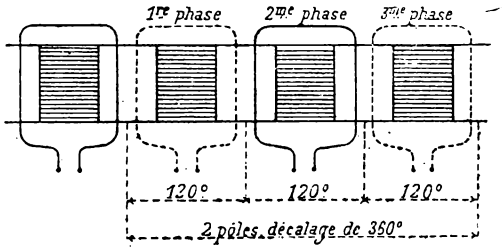


Fig. 12. — Alternateur Ganz-Zypernowsky. Développement d'un induit triphasé.

duction directe de la haute tension; aussi a-t-il été très employé autrefois dans ce but.

Inconvénients principaux. — La force électromotrice induite donne une courbe très différente de la sinusoïde.

Les pôles inducteurs doivent être entièrement feuilletés, car le flux varie beaucoup dans les pôles, suivant qu'ils sont devant les dents ou devant les encoches.

Le cuivre induit est mal utilisé dans les alternateurs polyphasés, à cause de l'emploi de bobines courtes.

La construction de ces alternateurs a été abandonnée complètement peu de temps avant 1900, mais il en existe encore un certain nombre en fonctionnement, dans les anciennes usines du Dauphiné, notamment.

Enroulement en tambour à courant continu, utilisé pour les alternateurs de faible puissance

L'enroulement en tambour à courant continu, comme l'enroulement à anneau, peut être employé pour réaliser un alternateur, en disposant, comme on le sait, des prises de courant reliées à des bagues.

Actuellement, l'enroulement en tambour à courant continu est encore employé pour produire du courant alternatif, mais seulement dans le cas des commutatrices ou dans celui des machines de faible puissance (au-dessous d'une vingtaine de chevaux), à cause de la simplicité avec laquelle on peut obtenir le courant continu nécessaire à l'excitation, en ajoutant un petit collecteur.

La construction de ces machines est sensiblement la même que celle des dynamos à courant continu.

CLASSIFICATION
SUIVANT LA NATURE DE L'INDUCTEUR

On peut classer les alternateurs, au point de vue de la forme ou de la nature de l'inducteur, de plusieurs façons différentes :

A. — *Suivant la nature de l'inducteur.* — I) Les alternateurs homopolaires, ou à flux ondulé;

II) Les alternateurs hétéropolaires, ou à flux alterné.

B. — *Suivant la nature de l'enroulement inducteur.* — 1° Les alternateurs à une seule bobine d'excitation;

2° Les alternateurs à plusieurs bobines d'excitation.

C. — *Suivant la partie tournante.* — *a*) Les alternateurs à induit fixe et inducteur mobile;

b) Les alternateurs à induit mobile et inducteur fixe;

c) Les alternateurs à enroulements inducteur et induit fixes, ou alternateurs à fer tournant.

I. — Alternateurs homopolaires

1° **Types à une seule bobine d'excitation.** — *a*) BOBINE D'EXCITATION MOBILE. — Dans la classe de l'induit à disque, l'alternateur

Mordey, dont on a déjà parlé, peut être considéré comme le type de cette catégorie.

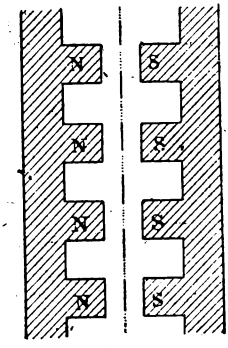


Fig. 13. — Alternateur Mordey à disque. Développement suivant un plan.

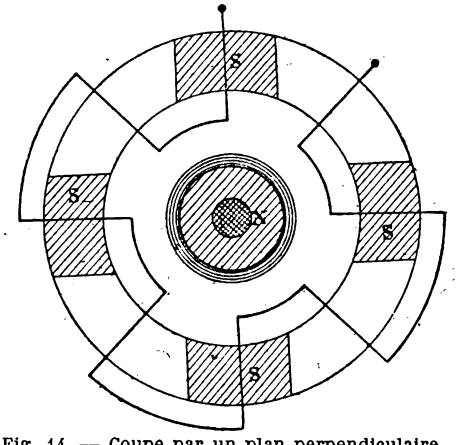


Fig. 14. — Coupe par un plan perpendiculaire à l'arbre de l'alternateur Mordey.

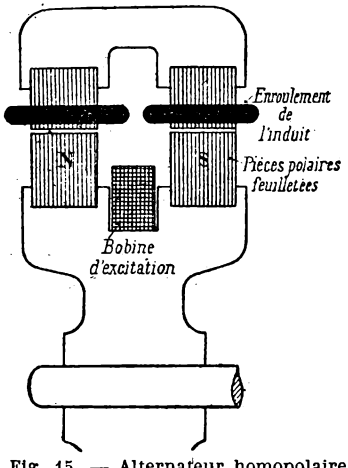


Fig. 15. — Alternateur homopolaire à tambour à une seule bobine inductrice. Coupe axiale.

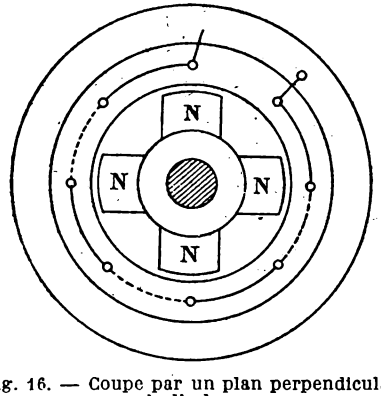


Fig. 16. — Coupe par un plan perpendiculaire à l'arbre.

L'inducteur est formé d'une roue en fonte sur laquelle est placée une grande bobine d'excitation ayant le même axe que l'arbre de l'alternateur.

Sur les deux côtés de cette roue sont boulonnées deux flasques formant les pièces polaires.

La figure 13 représente l'alternateur vu en supposant celui-ci coupé

à moitié par un plan passant par l'arbre et redressé ensuite suivant un plan.

La figure 14 représente une coupe par un plan perpendiculaire à l'arbre.

Comme on le voit, il n'y a qu'un seul circuit magnétique, mais qui, dans l'induit, se divise en plusieurs branches.

Dans le cas de l'induit en tambour, l'alternateur en coupe par un plan passant par l'arbre est représenté par la figure 15.

Si l'on regarde l'alternateur de face, on obtient la figure 16, dans

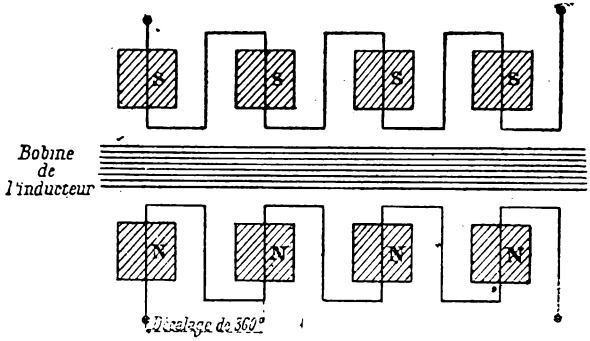


Fig. 17. — Alternateur homopolaire à une seule bobine inductrice et à deux circuits distincts pour l'induit.

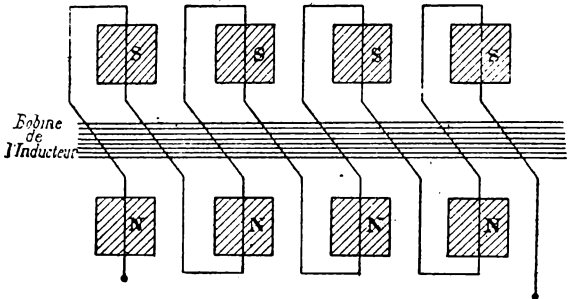


Fig. 18. — Alternateur homopolaire à une seule bobine inductrice et à un seul circuit induit.

laquelle on a représenté, schématiquement, l'enroulement de l'induit. En coupant cet alternateur par un plan passant par l'arbre, et en le supposant développé suivant un plan, on obtient la figure 17.

Il existe donc deux induits séparés : l'un recevant le flux sortant des pôles nord, l'autre parcouru par le flux rentrant par les pôles sud. Ces deux induits sont reliés ensemble par une carcasse massive

en fonte ou en acier servant au passage du flux d'un induit à l'autre. Bien que le flux qui traverse cette carcasse soit variable, on peut cependant la faire massive, car entre deux pôles le flux dans chaque induit a l'espace suffisant pour s'épanouir, de sorte que l'induction dans la carcasse reste sensiblement constante et la même en tous les points.

Comme il y a deux induits, on peut avoir deux enroulements distincts : l'un coupé uniquement par des pôles sud, l'autre par des pôles nord.

On peut coupler ces enroulements soit en série, soit en parallèle.

En décalant de 90° l'un de ces enroulements par rapport à l'autre, on réalise un alternateur diphasé.

Au lieu d'avoir deux enroulements distincts, on peut très facilement n'en avoir qu'un seul, en adoptant le dispositif de la figure 18.

On peut également décaler les pôles inducteurs au lieu de décaler les conducteurs induits (fig. 19).

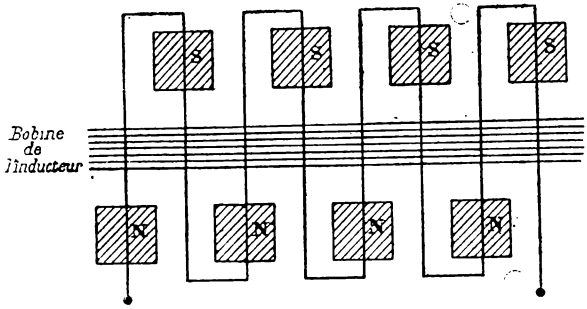


Fig. 19. — Alternateur homopolaire à bobine inductrice unique. Réalisation d'un circuit induit unique, par décalage des pôles inducteurs.

Dans le premier cas, l'alternateur est dit à pôles non décalés, et dans le second à pôles décalés.

Des alternateurs à pôles non décalés ont été construits par la Maison Brown-Boveri. Comme exemple de ce type aujourd'hui abandonné, on peut citer les alternateurs qui ont été fournis pour alimenter les tramways à courants triphasés de Lugano.

b) BOBINE D'EXCITATION FIXE. — *Alternateurs homopolaires à fer tournant et à une seule bobine d'excitation.* — Si dans les alternateurs précédents, on fixe à l'induit la bobine d'excitation, et si l'on fait tourner seulement le fer inducteur, on a des alternateurs sem-

blables aux précédents, mais dans lesquels tous les enroulements sont fixes. Ces alternateurs portent le nom d'*alternateurs à fer tournant.*

Ils ont eu beaucoup de succès il y a une vingtaine d'années environ, et ont été construits par toutes les grandes Maisons, en particulier par les ateliers d'Oerlikon, la Société Brown-Boveri, la Société Alioth, MM. Schneider et C^ie^, etc.

Il existe encore un grand nombre de machines pouvant se ramener en principe à ce type d'alternateur, comme les alternateurs Mordey, Thomson, Stanley, etc.

On se bornera ici à signaler seulement l'alternateur Thury, qui présente une forme intéressante, et dont on retrouve encore quelques modèles dans les Alpes, en particulier à l'usine de Chèvres près de Genève, à l'usine de carbure de Notre-Dame-de-Briançon.

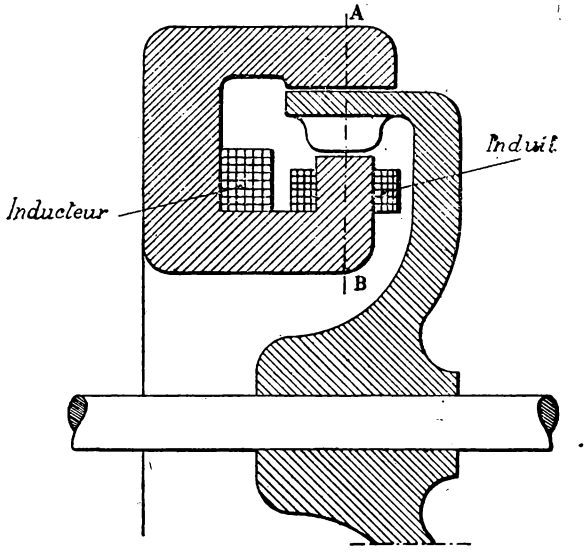


Fig. 20. — Alternateur Thury. Coupe axiale.

La figure 20 représente une coupe par un plan passant par l'arbre de l'alternateur Thury.

La figure 21 montre une coupe faite suivant AB.

Avec un peu d'attention, on voit facilement que cet alternateur est semblable en principe au type précédent, bien que la forme en soit assez différente.

Dans les alternateurs à fer tournant, les variations de flux dans l'induit ne sont pas produites par le déplacement relatif propre du flux et de l'induit, mais plutôt par la variation de réluctance du circuit magnétique; aussi appelle-t-on quelquefois ces alternateurs « alternateurs à réluctance variable ».

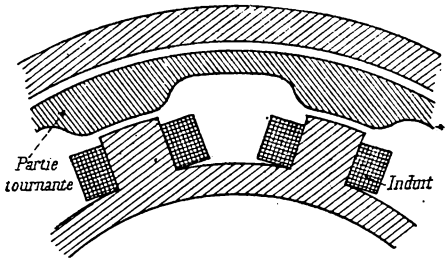


Fig. 21. — Alternateur Thury. Coupe par un plan perpendiculaire à l'arbre.

2° **Alternateurs homopolaires possédant plusieurs bobines d'excitation.** — C'est une erreur assez répandue que de croire que tous les alternateurs à une seule bobine sont homopolaires, et que tous ceux à plusieurs bobines sont hétéropolaires.

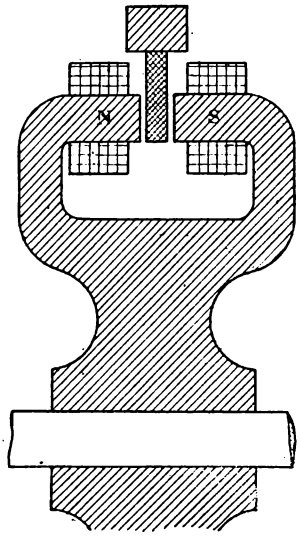


Fig. 22. — Alternateur homopolaire à plusieurs bobines inductrices mobiles.

En général, les alternateurs homopolaires ne possèdent qu'une seule bobine d'excitation; il est cependant possible d'en construire avec plusieurs bobines.

a) Bobines d'excitation mobiles. — Pour réaliser un alternateur homopolaire, il suffirait par exemple de remplacer la bobine unique de l'alternateur Mordey par plusieurs bobines placées sur les pièces polaires (fig. 22).

Ce genre d'alternateur n'offre aucun intérêt.

b) Bobines d'excitation fixes. — On peut également réaliser un alternateur homopolaire avec plusieurs bobines d'excitation fixes et à fer tournant.

Comme exemple, on peut citer l'alternateur Kingdon qui n'offre plus qu'un intérêt historique.

Dans cet alternateur (fig. 23), la carcasse portait une série de noyaux polaires sur lesquels étaient placés alternativement une bobine inductrice et une bobine induite.

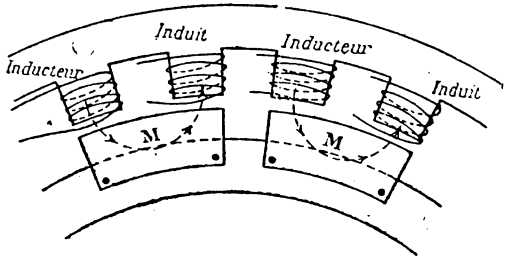


Fig. 23. — Alternateur Kingdon. Coupe par un plan perpendiculaire à l'axe.

Des masses de fer M, fixées à un volant, produisaient des variations de réluctance et par suite, des variations de flux dans les circuits magnétiques formés par une bobine de l'induit et une bobine de l'inducteur, d'où production d'une force électromotrice dans les bobines de l'induit.

II. — Alternateurs hétéropolaires.

1° **Une seule bobine d'excitation.** — *a*) Bobine d'excitation mobile. — Les premiers alternateurs de ce type ont été étudiés par M. Brown, ingénieur des ateliers d'Oerlikon, et construits dans ces ateliers vers 1890-91, pour le célèbre transport de force de Lauffen à Francfort.

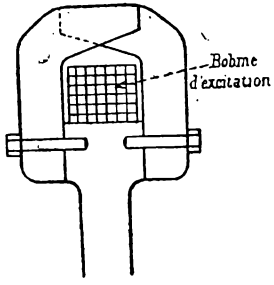


Fig. 24. — Alternateur Oerlikon (Lauffen-Francfort).

Alternateur d'Oerlikon. — Dans cet alternateur, l'induit était en tambour, du type moderne.

L'inducteur était formé par une roue en fonte sur laquelle était enroulée la bobine inductrice.

Sur chaque côté de cette roue était boulonné un bandage en acier

portant des pièces polaires ayant la forme représentée sur les figures 24 et 25. Ces pièces polaires étaient entrecroisées.

Ce type d'alternateur, qui est resté classique, fut remplacé par les alternateurs à fer tournant.

En outre des inconvénients inhérents à la bobine unique d'excitation (inconvénients que l'on indiquera dans la suite), ce type d'alternateur avait le défaut de posséder une très grande dispersion magnétique. Il en résultait une chute de tension considérable.

Ces alternateurs convenaient bien pour l'électrochimie, où l'on a précisément besoin d'une grande chute de tension pour limiter le courant de court-circuit.

C'était pour réduire la grande dispersion de l'alternateur d'Oerlikon que la maison Brown-Boveri avait imaginé de supprimer les parties des pôles en porte-à-faux et de créer ainsi le type d'alternateur homopolaire de la figure 19.

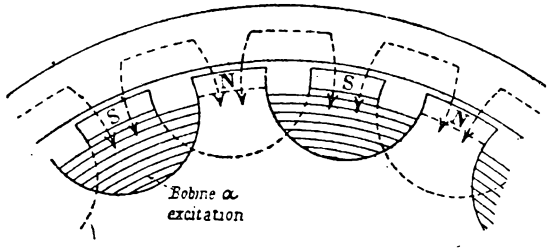


Fig. 25. — Alternateur Oerlikon (Lauffen-Francfort).

b) Bobinages inducteur et induit fixes. — *Alternateurs hétéropolaires à fer tournant avec une seule bobine d'excitation.* — Il serait possible de faire de semblables alternateurs, mais leur construction serait difficile et sans avantages; aussi n'en existe-t-il pas de modèles industriels.

2° **Alternateurs hétéropolaires à plusieurs bobines d'excitation.** — *a*) Bobines d'excitation mobiles. — Ce sont les alternateurs modernes dont nous étudierons la construction en détail dans cet ouvrage.

a) Bobinages induit et inducteur fixes. — *Alternateurs hétéropolaires à fer tournant et à plusieurs bobines d'excitation.* — Il

n'existe pas de modèles industriels de cette catégorie. Il serait cependant possible d'en créer. Pour s'en convaincre, il suffit d'imaginer un alternateur de Kingdon, dans lequel les bobines de l'inducteur, au lieu de donner des flux toujours dans le même sens, seraient disposées pour donner des flux alternés (bobines NS) dans les bobines B_1B_2... de l'induit.

Si on considère la bobine B_1 par exemple, on voit facilement que

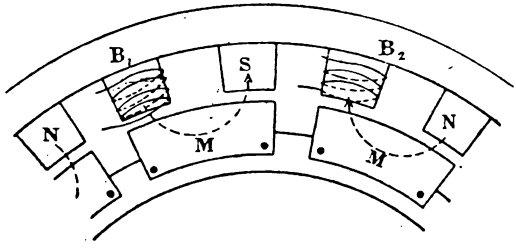


Fig. 26. — Alternateur hétéropolaire à fer tournant à plusieurs bobines d'excitation (première position).

le flux qui la traverse, dans le cas de la figure 27, est de sens inverse à celui qui la parcourt dans le cas où la partie tournante est placée comme l'indique la figure 26.

On peut donc réaliser ainsi un alternateur hétéropolaire à fer

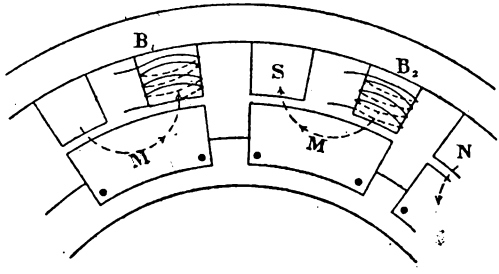


Fig. 27. — Alternateur hétéropolaire à fer tournant à plusieurs bobines d'excitation (deuxième position).

tournant, mais la construction d'un tel alternateur ne présente pas d'intérêt, à cause surtout de son poids considérable et de sa chute de tension énorme, qui serait due à la dispersion magnétique.

Comparaison entre les alternateurs homopolaires et hétéro-

polaires. — 1° *Au point de vue du poids.* — A puissance égale, les alternateurs homopolaires sont plus lourds et plus encombrants que les alternateurs hétéropolaires. Ainsi, d'après M. Boucherot, un alternateur hétéropolaire pesant 50 tonnes donnerait la même puissance qu'un alternateur homopolaire de 85 tonnes.

Ceci provient de ce que, toutes choses égales d'ailleurs, la force électromotrice induite est plus faible dans les alternateurs homopolaires que dans les hétéropolaires.

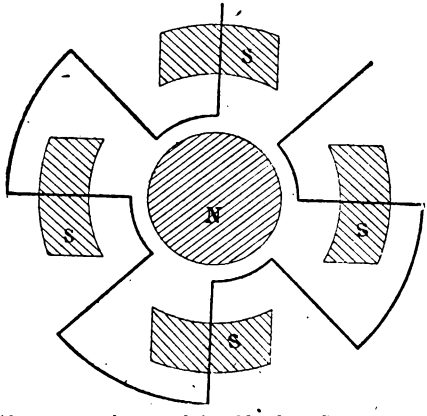


Fig. 28. — Alternateur homopolaire Mordey. Sommation des f. é. m. partielles des conducteurs induits.

Les figures 28 et 29 permettent de reconnaître que les conducteurs induits sont moins bien utilisés dans le cas de l'alternateur homopolaire.

2° *Au point de vue de la chute de tension.* — Elle est en général

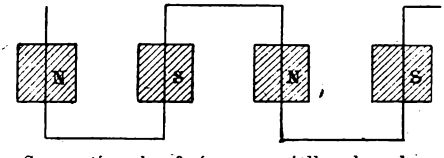


Fig. 29. — Sommation des f é. m. partielles dans les conducteurs induits d'un alternateur hétéropolaire.

plus grande dans les alternateurs homopolaires, car les fuites magnétiques (dispersion) sont plus considérables.

3° *Au point de vue des harmoniques.* — Les alternateurs hétéro-

polaires donnent une courbe de force électromotrice se rapprochant ordinairement davantage de la sinusoïde.

Dans les alternateurs homopolaires, les maxima et les minima de la courbe de la force électromotrice peuvent très bien ne pas être équidistants des points de tension nulle, d'où souvent la présence d'harmoniques d'ordre pair.

4° *Au point de vue de la robustesse.* — Le principal avantage des alternateurs homopolaires résidait autrefois dans la possibilité de constituer avec eux, d'une façon pratique, des alternateurs à fer tournant qui, par suite de l'absence d'enroulements mobiles, présentaient une grande solidité et permettaient d'atteindre de grandes vitesses tangentielles, pouvant dépasser 40 mètres par seconde.

Actuellement, cet avantage n'offre plus d'intérêt puisque l'on arrive très bien, et sans inconvénients, avec des alternateurs hétéropolaires, aux mêmes vitesse tangentielles en employant des bobines inductrices faites d'un ruban de cuivre enroulé sur champ.

Avantages et inconvénients d'une bobine unique d'excitation. — *Avantages.* — Economie très sensible de cuivre, de courant d'excitation et de main-d'œuvre.

Inconvénients. — 1° L'inconvénient le plus grave est le suivant : Par suite de la dilatation due à l'échauffement, les conducteurs prennent un peu de jeu et de légers déplacements se produisent alors dans les spires, sous l'influence des vibrations et des à-coups. A la longue, le frottement dû à ces déplacements finit par user l'isolement des fils et par déterminer des courts-circuits à l'intérieur de la bobine.

Ce défaut se reconnaît facilement par la nécessité où l'on est d'augmenter le courant d'excitation pour maintenir constant le nombre d'ampères-tours, et par suite la tension, malgré la réduction du nombre de spires, celles qui sont en court-circuit étant inutiles.

Dans le cas d'un moteur synchrone, ce défaut se décèle à l'augmentation du courant de ligne absorbé par le moteur, ou bien à la nécessité d'augmenter le courant inducteur pour obtenir le même courant de ligne, toutes choses égales d'ailleurs.

Ces courts-circuits se produisent d'autant plus facilement que les bobines sont plus grandes, car les conducteurs peuvent se déplacer

plus aisément, aussi étaient-ils assez fréquents dans les inducteurs munis d'une seule bobine d'excitation. C'est surtout pour cette raison que l'on a abandonné actuellement la bobine d'excitation unique;

2° La réparation d'une bobine d'excitation unique est toujours plus difficile que le changement ou la réparation d'une bobine polaire;

3° La dispersion magnétique est beaucoup plus grande avec une bobine unique qu'avec des bobines placées sur les noyaux polaires, *c'est-à-dire près de l'induit;*

4° La self-induction d'une bobine unique étant très grande, celle-ci risque fort d'être percée par l'extra-courant de rupture, si le circuit d'excitation vient à être coupé trop brusquement.

Avantages et inconvénients des alternateurs à fer tournant. — Le principal avantage de ces alternateurs était, comme on l'a déjà dit, d'être très robustes, puisque la partie tournante était simplement formée de masses de fer sans enroulements.

Comme inconvénients, on peut surtout reprocher aux alternateurs à fer tournant — qu'ils soient homopolaires ou hétéropolaires — un poids considérable et une grande chute de tension.

Avantages présentés par le choix d'un induit fixe et d'un inducteur mobile. — 1° Il est plus facile d'isoler des enroulements fixes que des enroulements mobiles. En outre, les trépidations usent les isolants.

Or l'inducteur est toujours à basse tension, rarement au-dessus de 110 volts, tandis que l'induit, dans les alternateurs actuels, doit produire en général un courant à haute tension;

2° Le courant absorbé par l'inducteur correspondant au plus à 3 % de la puissance débitée par l'induit, il est bien plus facile de faire passer ce courant par des bagues tournantes et des balais;

3° L'inducteur est plus robuste que l'induit. Celui-ci doit être toujours feuilleté et muni d'encoches, tandis que les pôles inducteurs sont souvent massifs et peuvent être fixés solidement à la roue polaire;

4° L'inducteur, étant plus lourd et plus massif, peut former volant plus facilement que l'induit.

REMARQUES GÉNÉRALES. — L'étude que l'on vient de faire des principaux types d'alternateurs employés autrefois permet de se rendre compte maintenant de la façon dont s'est modifiée la construction des alternateurs, et de comprendre les raisons qui ont déterminé les constructeurs à adopter le type moderne.

Tout d'abord, il semble que ce soit principalement sur l'induit que les constructeurs aient commencé à porter leur attention. Cela se comprend facilement, car, si au début les inducteurs avaient un fonctionnement satisfaisant, les induits, qui étaient surtout du type à disque, présentaient les graves inconvénients que l'on a signalés.

Peu à peu, les induits à disque et à anneau ont été abandonnés pour les induits polaires, puis pour les véritables induits en tambour, c'est-à-dire les induits modernes.

Pendant que l'induit, point délicat de la machine, se modifiait ainsi, l'inducteur, d'une construction plus robuste et plus facile, semblait plutôt subir les transformations de l'induit, et les constructeurs paraissaient moins chercher à lui donner les dispositions en fait les plus avantageuses, à son point de vue propre, que de s'efforcer de l'adapter aux diverses formes de l'induit.

Une fois que l'induit eut obtenu la forme qu'il a à peu près conservée actuellement, l'attention des constructeurs se porta alors principalement sur l'inducteur, qui subit des modifications importantes et intéressantes, mais qui finit par reprendre la forme simple qu'il avait autrefois dans les alternateurs de Lontin (1876) (alternateur analogue à celui de Ganz-Zypernowsky avec induit polaire fixe et son inducteur hétéropolaire tournant), de Gramme, de Ganz-Zypernowsky, etc...

On chercha surtout à simplifier l'inducteur en ne mettant qu'une seule bobine d'excitation. C'est en 1891 que sortirent des ateliers d'Oerlikon les alternateurs hétéropolaires à une seule bobine, destinés au transport d'énergie de Lauffen à Francfort. Les alternateurs de ce type, restés célèbres sous le nom d'alternateurs de Lauffen, ont été abandonnés vers 1893-1894, pour se voir préférer les alternateurs à fer tournant, dont on espérait beaucoup il y a une vingtaine d'années.

Ainsi qu'on l'a déjà dit, en effet, les alternateurs de Lauffen présentaient une grande dispersion. La Maison Brown-Boveri imagina d'abord de couper les parties des pièces polaires en porte-à-faux, puis,

comme la bobine unique d'excitation était sujette à de fréquents courts-circuits intérieurs, à cause de son mouvement de rotation, il vint naturellement à l'esprit des constructeurs de fixer celle-ci à l'induit et de ne faire tourner que le fer inducteur.

Les alternateurs à fer tournant furent très appréciés, surtout dans les usines électrochimiques, alors très prospères, mais, un peu avant 1900, lorsque les distributions de force motrice et d'éclairage commencèrent à prendre un développement considérable, il fallut chercher à établir des machines d'un poids moins grand et surtout possédant une chute de tension plus faible. On abandonna alors résolument la bobine unique d'excitation, et par suite les alternateurs à fer tournant, pour adopter le type moderne, que l'on va maintenant étudier en détail.

CHAPITRE II

CONSTRUCTION DES ALTERNATEURS MODERNES

Généralités — Étude détaillée de l'induit Enroulements pratiquement employés

GÉNÉRALITÉS

Dispositions communes à tous les alternateurs modernes. — On peut, par ce qui précède, comprendre pourquoi tous les constructeurs ont adopté actuellement les dispositions suivantes :

Inducteur hétéropolaire;

Induit fixe, inducteur mobile;

Induit extérieur entourant l'inducteur (sauf pour quelques alternateurs volants);

Tous les pôles inducteurs bobinés (on ne fait plus d'inducteurs à une seule bobine);

Induit toujours à tambour, avec encoches et plusieurs encoches par pôle;

Bobines induites toujours longues (plus de bobines courtes).

Points principaux qui permettent encore de différencier les alternateurs des divers constructeurs. — Les alternateurs des divers constructeurs ne diffèrent plus maintenant entre eux que par quelques modifications, souvent très peu importantes, apportées principalement aux parties suivantes :

Les *pièces polaires,* que chaque constructeur établit à sa manière, plus ou moins empiriquement, pour obtenir une force électromotrice bien sinusoïdale.

Les *encoches de l'induit,* qui sont tantôt complètement ouvertes, afin de faciliter le changement des bobines induites, tantôt à demi-fermées, dans le but d'obtenir surtout une force électromotrice induite bien sinusoïdale. On ne fait plus d'alternateurs avec encoches complètement fermées, sauf parfois pour les turbo-alternateurs.

La *carcasse,* que les constructeurs modifient surtout pour donner une grande rigidité à l'induit, assurer une bonne ventilation, faciliter les réparations et enfin donner à la machine une forme originale, caractéristique de l'atelier.

Actuellement, les constructeurs se préoccupent surtout :

1° D'obtenir des courbes de force électromotrice bien sinusoïdales.

Il est bon à ce sujet de signaler dès maintenant au lecteur que les harmoniques peuvent être dues aux causes principales suivantes :

Forme des encoches de l'induit;

Nombre de ces encoches;

Forme des pièces polaires;

Ecartement des pôles;

2° De faciliter les réparations;

3° D'assurer une bonne ventilation afin de pouvoir, toutes choses égales d'ailleurs, augmenter la puissance de leurs machines, et par suite réduire leur prix.

CLASSIFICATION DES ALTERNATEURS MODERNES

Pour un même constructeur, les alternateurs peuvent prendre des formes différentes suivant la vitesse angulaire, la destination des alternateurs, la tension, le nombre de phases et la position de l'arbre.

I. Suivant la vitesse

a) **Alternateurs à vitesse angulaire lente ou alternateurs volants.** — Actionnés ordinairement par des machines à vapeur à

piston, par des moteurs à gaz ou par des turbines hydrauliques pour basses chutes et tournant entre 60 et 150 tours par minute.

b) **Alternateurs à vitesse angulaire moyenne.** — Commandés ordinairement par des turbines hydrauliques ou des machines à vapeur à piston à grande vitesse. Leur vitesse varie de 150 à 1.500 tours par minute, suivant leur puissance, et suivant la hauteur de la chute, dans le cas d'une installation hydraulique.

c) **Alternateurs à très grande vitesse angulaire.** — Actionnés surtout par des turbines à vapeur, d'où le nom qu'on leur donne parfois de « turbo-alternateurs ».

Leur vitesse est comprise entre 750 tours pour les très grandes puissances (30.000 kilovolts-ampères) à 3.000 tours pour les puissances moyennes. Ces alternateurs ne se construisent pas en général pour des puissances inférieures à 500 kilovolt-ampères.

II. Suivant la destination des alternateurs

Alternateurs pour l'électrochimie. — Ordinairement à basse tension et à très grande intensité, et possédant une chute de tension considérable pour éviter un courant exagéré, lorsqu'un court-circuit se produit dans les fours.

Alternateurs pour transport d'énergie et distribution d'éclairage. — Le plus souvent à moyenne tension (1.000 à 10.000 volts) et possédant une chute de tension relativement faible, pour éviter des variations de voltage trop grandes avec la charge, ou un réglage de la tension trop difficile.

III. Suivant la tension

Alternateurs à basse tension.

Alternateurs à haute et moyenne tensions.

La différence ne porte que sur les isolants et sur les enroulements, qui sont à barres dans le premier cas et à bobines dans le second.

IV. Suivant la fréquence

La construction des alternateurs est la même pour toutes les fréquences employées industriellement (de 16 à 60 périodes par seconde); seulement les alternateurs ont des dimensions d'autant plus grandes et sont par suite d'autant plus coûteux que la fréquence est plus basse. Pour les machines à très basse fréquence, il convient de prendre des précautions pour que les vibrations, qui tendent à devenir très importantes, ne nuisent pas à la bonne conservation des isolants.

V. Suivant le nombre de phases

Alternateurs monophasés.
Alternateurs triphasés.
Alternateurs diphasés.

VI. Suivant la position de l'arbre

Alternateurs à arbre horizontal.
Alternateurs à arbre vertical.

On étudiera d'abord les dispositions communes à tous les alternateurs et on examinera ensuite les conditions à remplir et les différentes formes adoptées suivant les cas que l'on vient d'indiquer.

DIMENSIONS DES ALTERNATEURS

Pour une fréquence déterminée, les dimensions des alternateurs dépendent à la fois de leur puissance et de leur vitesse angulaire.

On est souvent porté à croire que, dans un alternateur, la vitesse angulaire seule détermine le diamètre, par la condition que la vitesse tangentielle soit la plus grande possible, et que la puissance donne ensuite la largeur.

D'après cela, tous les alternateurs ayant la même vitesse angulaire auraient le même diamètre, et il suffirait, pour obtenir la puissance voulue, de prendre une largeur convenable.

Ce serait vrai si l'on ne devait tenir compte que de la matière active

électrique et magnétique, c'est-à-dire si l'on ne devait considérer que les matériaux nécessaires pour constituer les circuits électriques et magnétiques, mais, comme le disait M. Boucherot, dans une conférence faite à la Société Française de Physique, *il y a les matériaux de soutènement qui doivent se payer également.* Il faut, en effet, surtout à cause des attractions magnétiques et de la force centrifuge, donner à l'induit et à l'inducteur une très grande rigidité. La carcasse et la roue polaire doivent donc avoir des dimensions et un poids considérables, et d'autant plus forts que le diamètre est plus grand; *aussi, pour une même vitesse angulaire, donne-t-on des diamètres plus petits aux machines de faible puissance.*

Pour bien comprendre l'influence de la puissance et de la vitesse angulaire sur les dimensions des alternateurs, on peut raisonner ainsi :

La force électromotrice e_{max} développée dans un conducteur de l'induit est donnée par la relation :

$$e_{max} = \mathcal{B}_{max} \, LV$$

$\mathcal{B}_{max}$ = induction maximum dans l'induit
L = largeur de l'induit
V = vitesse de déplacement du flux inducteur
= vitesse tangentielle de l'inducteur.

Si l'on désigne par A un facteur tenant compte du nombre de conducteurs par pôle et du coefficient de réduction du bobinage, la force électromotrice totale pour 2 p pôles est :

$$E_{max} = A.2\,p.\mathcal{B}_{max} \, LV$$

$$E_{max} = 2 \; Ap \, \mathcal{B}_{max} \, L\pi \, \frac{DN}{60}$$

D = diamètre de l'inducteur
N = nombre de tours par minute.

Pour une même intensité, la puissance P de l'alternateur est proportionnelle à E_{max}. (Si l'on voulait faire varier P en faisant varier l'intensité, la tension étant supposée la même, on verrait facilement que P serait encore proportionnelle aux quantités contenues dans la formule de E_{max}, car, pour faire varier l'intensité sans changer la tension, il suffit de réaliser un montage convenable en parallèle des conducteurs de l'induit.)

Influence de la puissance sur les dimensions des alternateurs pour une même vitesse angulaire. — Si la vitesse angulaire et la fréquence sont données, p sera fixé.

L'induction $\mathcal{B}$ et le facteur A, bien que variant en réalité avec la puissance, peuvent cependant ici être supposés indépendants de celle-ci, car on ne cherche, dans cette approximation grossière, qu'à se rendre compte de l'influence de certaines quantités.

Donc E_{max} et par suite la puissance P ne dépendent que de D et de L.

Pour faire varier la puissance, il faudra donc faire varier convenablement ces deux quantités.

Comme le poids d'un alternateur peut être supposé grossièrement proportionnel à la largeur L de l'induit et au carré du diamètre D [1], il en résulte que l'on a intérêt à prendre *un diamètre le plus petit possible et à augmenter la largeur en conséquence.*

On est limité dans la réduction du diamètre par plusieurs conditions, notamment par les suivantes :

Pouvoir loger tous les conducteurs sur l'induit;

Pouvoir placer convenablement les pôles inducteurs (ceux-ci devant être, autant que possible, aussi larges que longs, pour réduire au minimum le poids du cuivre dans les bobines inductrices);

Donner, dans certains cas (alternateurs volants), un moment d'inertie suffisant à la partie tournante, etc...

Comme ces conditions ont d'autant plus d'influence que la puissance de l'alternateur est plus considérable, on est donc *obligé d'augmenter le diamètre avec la puissance de l'alternateur.*

En résumé, *pour une vitesse angulaire et une fréquence déterminées, on devra chercher à donner à l'alternateur un diamètre aussi petit que possible, mais ce diamètre pourra être d'autant moins petit que la puissance sera plus grande.*

Influence de la vitesse angulaire sur les dimensions des alternateurs pour une même puissance. — La puissance, c'est-à-dire E_{max}, étant donnée, ainsi que la fréquence, on voit, par la formule

(1) Ce serait vrai si l'alternateur était un cylindre plein et si le diamètre extérieur de la carcasse de l'induit ainsi que la largeur totale de l'alternateur étaient respectivement proportionnels à D et à L.

donnant E_{max}, que si l'on double par exemple la vitesse angulaire, le nombre des pôles devant être divisé par 2, pour que la fréquence reste la même, les dimensions de L et D paraissent ne pas devoir changer.

Cependant, si l'on conserve le même diamètre D, comme en doublant la vitesse angulaire on quadruple la force centrifuge ($m\omega^2 r$), celle-ci peut devenir trop considérable.

On doit donc réduire D, et on le peut d'autant mieux que le nombre de pôles étant diminué, il faut donner à la circonférence de l'induit une longueur bien moins grande pour pouvoir loger les conducteurs induits et disposer convenablement les pôles inducteurs.

En diminuant le diamètre, malgré l'augmentation proportionnelle de la largeur de la machine, on réduit, ainsi qu'on l'a vu, le poids de celle-ci.

Donc, *pour une même puissance et une même fréquence, en augmentant la vitesse angulaire, on diminue le poids, et, par suite, le prix des alternateurs.* — On voit tout l'intérêt qu'il y a, lorsqu'on le peut, à adopter de grandes vitesses angulaires. Il existe cependant, à ce point de vue, une limite, ainsi qu'on le verra dans l'étude de la construction des alternateurs commandés directement par des turbines à vapeur.

Plusieurs autres considérations entrent également en jeu pour la détermination des dimensions les plus convenables à donner à un alternateur; aussi celle-ci ne peut-elle être faite que par tâtonnements et empiriquement.

VITESSES ANGULAIRES DES ALTERNATEURS

La vitesse angulaire d'un alternateur dépend de la fréquence et du nombre de pôles.

On sait que si

f = fréquence

$2p$ = nombre de pôles,

on a, pour le nombre de tours par minute :

$$N = \frac{f \times 60}{p}$$

Ainsi un alternateur à 4 pôles devra tourner 1.500 tours pour donner du courant à 50 périodes.

La fréquence f étant toujours donnée (ordinairement $f=50$ ou 25), on voit que la relation

$$Np = 60\ f = C^{te}$$

représente une hyperbole équilatère (courbe de N en fonction de p) (fig. 30).

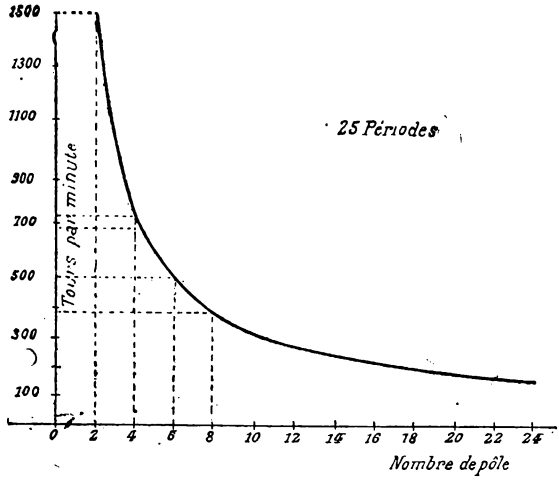


Fig. 30. — Relation entre le nombre de pôles et de tours dans un alternateur à fréquence constante.

Cette courbe, que l'on a tracée ici pour la fréquence de 25 périodes, montre que le nombre de vitesses qu'il est possible de choisir pour un alternateur est très réduit dans le cas de grandes vitesses angulaires, puisque pour 25 périodes, par exemple, on ne peut faire tourner l'alternateur qu'à 500, 750 ou 1.500 tours.

C'est là un inconvénient assez grave, surtout pour les alternateurs devant être commandés par des turbines à vapeur.

MATÉRIAUX EMPLOYÉS EN CONSTRUCTION ÉLECTROMÉCANIQUE

Les carcasses, les bâtis de machines, les croisillons sont généralement en fonte ou en acier, quelquefois en fer.

Caractères des fers, fontes, aciers employés. — Ce sont des alliages de fer pur et de carbone dont les propriétés varient suivant la proportion de carbone.

1° **Fers.** — Contiennent moins de 0,6 % de carbone. Ils sont malléables, soudables, tenaces, trempent peu ou mal. Fondent de 1500 à 1600°.

2° **Aciers.** — Ainsi appelés lorsque la proportion de carbone varie de 0,6 à 2,5 %.

De 0,6 à 1 % on a les aciers doux.

De 1,5 à 2,5 % on a les aciers durs.

Ils sont malléables, tenaces, ductiles et prennent bien la trempe. Fondent de 1300 à 1450°.

Les aciers extraordinaires doux sont en quelque sorte de véritables fers, mais ce qui les distingue de ceux-ci c'est qu'ils peuvent être coulés et moulés, tandis que les fers sont travaillés à la forge.

3° **Fontes.** — 2,5 à 5 % de carbone, ni malléables, ni soudables, sans ténacité. Fondent entre 1050° et 1300°.

Les fontes blanches étant trop fragiles, trop dures à travailler et peu homogènes, ne sont pas employées dans la construction des machines électriques.

Les fontes grises se travaillent et se moulent plus facilement, et sont moins fragiles.

Emploi des fers, fontes, aciers. — Le fer a été employé autrefois par quelques constructeurs pour constituer les inducteurs de machines à courant continu (inducteurs des machines Thury par exemple), mais malgré l'avantage qu'il possède d'avoir une très grande perméabilité, on lui a souvent préféré la fonte, moins coûteuse et permettant de couler et de mouler l'inducteur en une ou deux pièces, tandis qu'avec le fer il faut le forger en plusieurs pièces.

Actuellement, on emploie pour les inducteurs soit *la fonte*, soit un acier *extra doux spécial* que l'on est parvenu à fabriquer et à mouler dans de bonnes conditions.

Dans les inducteurs, ce qu'il faut chercher surtout, c'est une grande perméabilité. On n'a évidemment pas dans ce cas à tenir compte du phénomène de l'hystérésis.

Nous reproduisons ici, provenant de l'ouvrage de M. Hobart, *Moteurs électriques,* différentes courbes permettant de calculer les

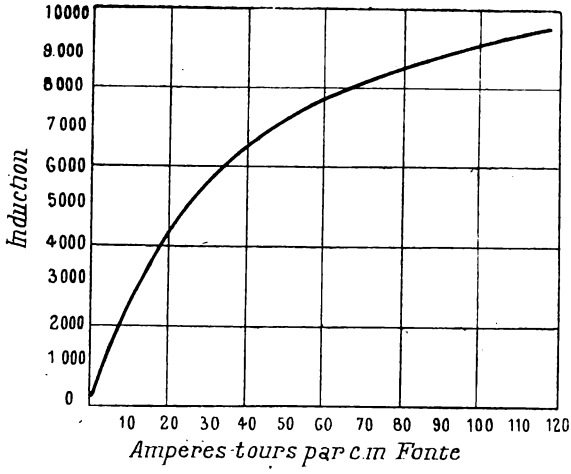


Fig. 31. — Ampère-tour par cm. Fonte.

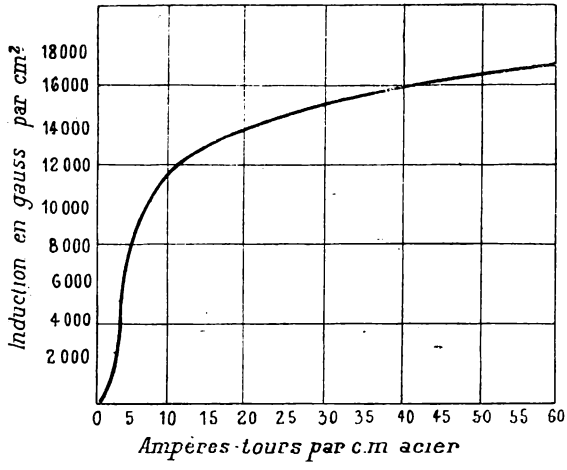


Fig. 32. — Ampère-tours par cm. dans les tôles et le fer forgé.

forces magnétomotrices en ampère-tours par centimètre nécessaires pour obtenir une induction déterminée dans le fer, la fonte, l'acier, ainsi que dans l'entrefer des dynamos.

On remarquera que, pour l'entrefer, la force magnétomotrice est

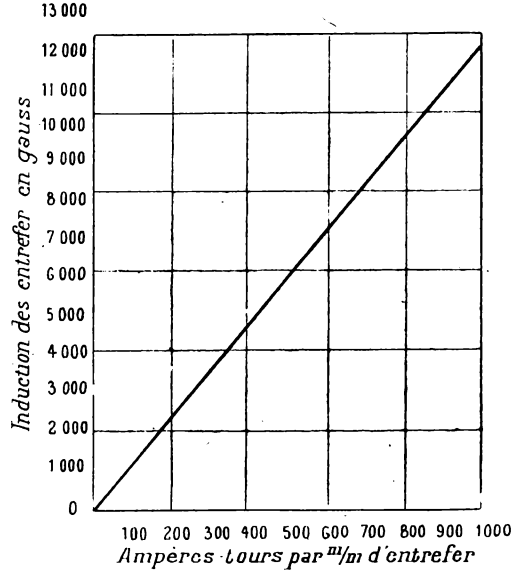


Fig. 33. — Ampère-tours par mm. d'entrefer.

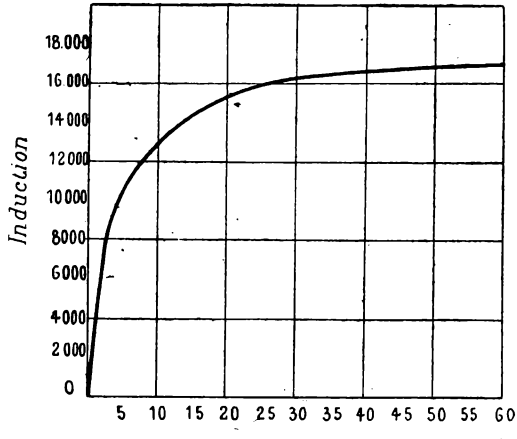


Fig. 34. — Ampère-tours par cm. Acier.

donnée en ampères-tours par millimètre d'épaisseur radiale de l'entrefer, l'induction étant donnée par centimètre carré de surface polaire.

Induction dans les dents. — La saturation des dents étant souvent trop forte, la perméabilité du fer des dents diminue alors considérablement pour devenir presque égale à celle de l'air. Il en résulte qu'une partie notable du flux passe dans l'encoche.

Il faut donc considérer *l'induction réelle* des dents et non *l'induction apparente* qui correspondrait au passage du flux total dans les dents et qui nécessiterait (comme on le voit par les courbes) une force magnétomotrice bien supérieure.

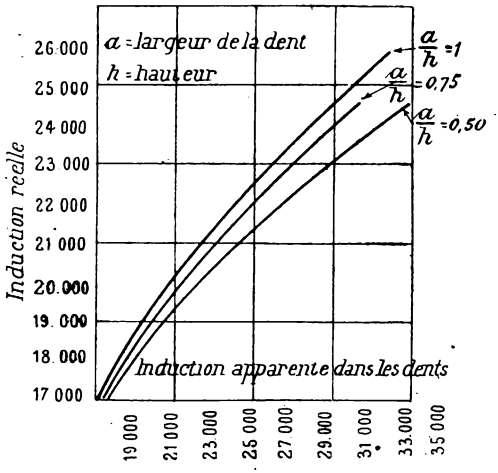


Fig. 35. — Induction apparente dans les dents.

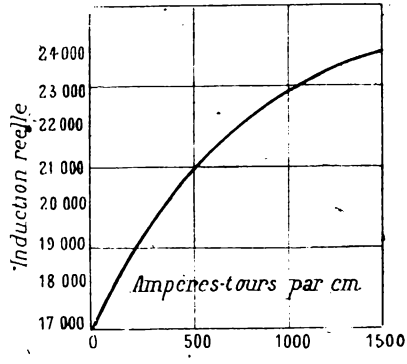


Fig. 36. — Ampère-tours par cm.

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE L'INDUIT

L'induit est essentiellement formé de tôles isolées et empilées les unes sur les autres de façon à constituer un anneau plus ou moins grand, à l'intérieur duquel tourne l'inducteur. Sur la surface intérieure de cet anneau sont disposés les conducteurs, dans lesquels prennent naissance les forces électromotrices partielles que des connexions convenables permettent de sommer.

L'induit comprend trois parties principales que nous allons étudier successivement :

1° La carcasse ou le bâti de l'induit avec la plaque de fondation;

2° Les tôles formant le circuit magnétique;

3° L'enroulement.

I. Carcasse ou bâti de l'induit

Elle a pour rôle de maintenir les tôles. Nous verrons plus loin, à propos du serrage des tôles de l'induit, les formes de carcasse les plus employées.

La carcasse est presque toujours en fonte, sauf de rares exceptions.

Elle doit être établie en vue surtout :

1° *De posséder une très grande rigidité pour lui permettre de supporter le poids des tôles et de résister surtout aux attractions magnétiques dues à l'inducteur.* — Ces attractions magnétiques sont très considérables. (Voir plus loin l'influence des attractions magnétiques sur l'inducteur.)

Si la carcasse n'est pas assez rigide, elle peut se déformer, ce qui peut avoir pour effet de produire des dissymétries dans l'entrefer et, par suite, des attractions encore plus considérables, et inégalement réparties.

Pour assurer à la carcasse une grande rigidité, sans trop l'alourdir, on lui donne une forme creuse avec de fortes nervures.

2° *D'assurer une bonne ventilation de l'induit.* — A cet effet, elle doit être munie d'ouvertures suffisantes et convenablement espacées pour laisser passer l'air envoyé par les pôles inducteurs formant

ventilateur centrifuge. Il faut que cet air soit dirigé de façon à refroidir l'induit le mieux possible.

3° *De permettre avec facilité le transport, le montage et le démontage.* — C'est, en effet, une chose à laquelle on attache actuellement une très grande importance. Il est souvent plus intéressant pour l'exploitant de posséder une machine robuste facilement réparable qu'une machine ayant, par exemple, un meilleur rendement, mais délicate et nécessitant des réparations difficiles, causant des arrêts très préjudiciables.

On doit donc, autant que possible, construire les différentes pièces de la machine sur gabarit afin d'avoir des pièces facilement interchangeables.

Avec les bobines faites sur gabarit, les pôles inducteurs empêchant le remplacement de celles-ci, il faut :

Ou bien, les pôles inducteurs étant fixés à la roue polaire par des boulons, dévisser seulement les pôles qui sont devant les bobines à changer;

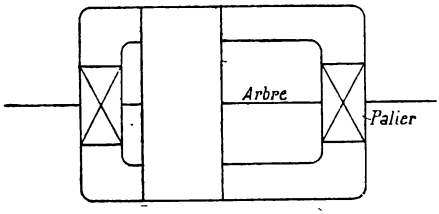


Fig. 37. — Bâti d'alternateur permettant le déplacement latéral de l'induit.

Ou bien, les pôles inducteurs étant venus de fonte avec la roue polaire, et ne pouvant par suite être enlevés, donner à la plaque de fondation une forme très allongée, avec les deux paliers très écartés (fig. 37) afin de pouvoir déplacer latéralement l'induit et le dégager de l'inducteur (fig. 38).

Dans le cas où, par suite de l'emploi d'encoches à moitié fermées, le bobinage est fait à la main directement sur la machine, les pôles inducteurs n'empêchent pas le remplacement de celui-ci. Le bobinage étant alors difficilement accessible, à la partie inférieure de l'induit, on fait porter la carcasse sur la plaque de

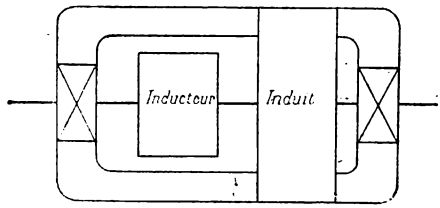


Fig. 38. — Induit déplacé sur le bâti pour faciliter la réparation du bobinage.

fondation par l'intermédiaire de deux semelles S, que l'on peut enlever pour faire reposer l'induit sur l'inducteur et le faire tourner

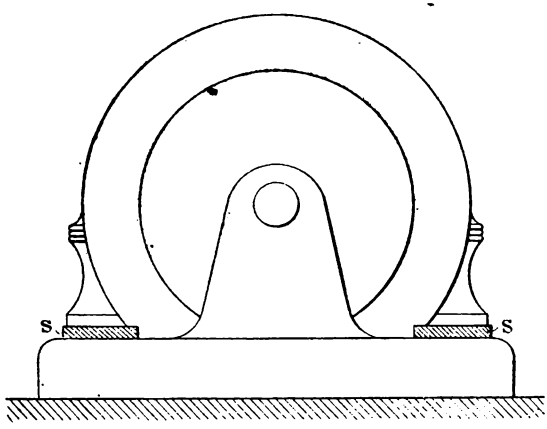


Fig. 39. — Bâti d'alternateur à semelles.

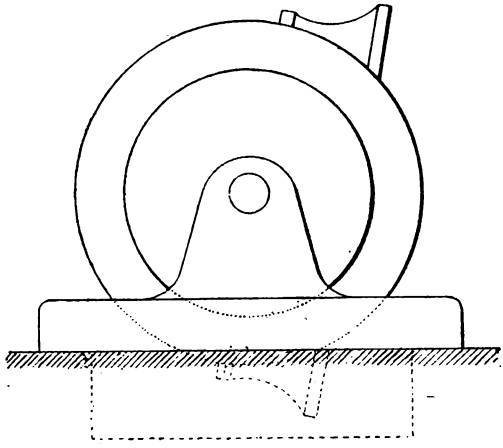


Fig. 40. — Bâti d'alternateur à semelles.
Rotation de l'induit sur l'inducteur.

autour de l'arbre pour que l'on puisse amener sa partie inférieure au-dessus de la plaque de fondation (fig. 39 et 40).

Cette disposition est également employée avec les bobines faites

sur gabarit lorsqu'on ne peut pas donner aux paliers un écartement suffisant pour permettre le déplacement latéral de l'induit et qu'il est possible de dévisser les pôles inducteurs.

Bien entendu, il faut pouvoir soulever très facilement les flasques qui servent à préserver l'enroulement. (Voir plus loin fig. 100, 102, 104, etc...)

Il convient aussi de :

1° Diviser en plusieurs pièces les parties de la machine appelées à être souvent démontées, afin de faciliter cette opération. A partir d'une certaine puissance, les coussinets par exemple doivent être toujours en deux pièces au moins.

On est également souvent obligé de diviser la machine en plusieurs pièces, ayant chacune un poids limité, afin de faciliter le transport et le montage, de permettre le passage sur les ponts suspendus (la charge ordinaire pour certains ponts doit être souvent inférieure à 5 tonnes), etc...

2° D'employer, pour fixer chaque pièce devant se démonter, des boulons ou des tiges filetées avec écrous à six pans. Les écrous doivent pouvoir être facilement serrés ou desserrés.

Pour éviter le desserrage des écrous par les vibrations, on emploie ou des contre-écrous, ou une feuille de tôle placée entre l'écrou et la rondelle et dont on rabat les deux coins sur les pans de l'écrou, etc...

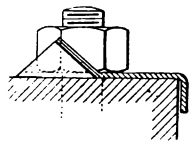


Fig. 41. — Dispositif pour éviter le desserrage des écrous.

Plaque de fondation. — La plaque de fondation, que l'on appelle aussi quelquefois bâti, est une pièce en fonte servant à relier d'une façon bien rigide la carcasse de l'induit avec les deux paliers, pour assurer une position de l'induit par rapport à l'inducteur parfaitement déterminée et bien constante (fig. 42).

La carcasse de l'induit et les deux paliers sont maintenus par les boulons B_1 (fig. 42 et 43) sur la plaque de fondation qui est creuse, mais possède des nervures *n* avec des parties massives pour recevoir les boulons B_1. De véritables vis calantes V servent à déplacer la carcasse légèrement en hauteur, pour permettre le réglage de l'entrefer. Lorsque celui-ci est effectué, on place des tôles d'épaisseur

convenable entre la carcasse et la plaque de fondation, puis l'on serre à fond les boulons B_1. On peut aussi employer le même dispositif avec les paliers.

Souvent l'on place des goupilles comme celle qui est marquée G sur la figure 164, pour pouvoir repérer d'une façon exacte la

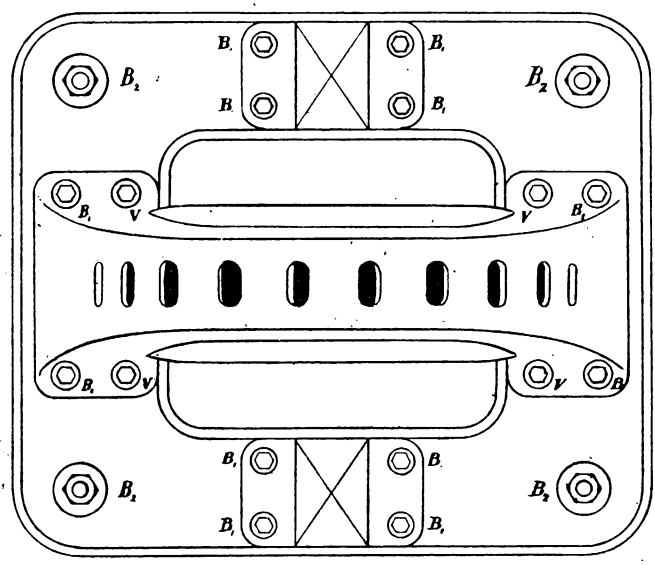


Fig. 42. — Fixation de la carcasse et des paliers sur la plaque de fondation.

position de la carcasse et des paliers par rapport à la plaque de fondation.

La plaque de fondation est fixée solidement sur un massif en maçonnerie au moyen des boulons de scellement B_2.

Pour les alternateurs volants, la plaque de fondation est en plusieurs pièces indépendantes, placées sous chaque côté de la carcasse et sous les paliers. Etant données les grandes dimensions de ces machines, il serait trop coûteux de rendre les paliers solidaires de la carcasse par l'emploi d'une pièce en fonte.

Par raison d'économie, quelques constructeurs suppriment parfois la plaque de fondation commune aux paliers et à la carcasse, même pour des machines à moyenne vitesse. C'est une économie qui n'est

pas à conseiller. Lorsque les paliers sont montés indépendamment l'un de l'autre et de l'induit, sur un même massif de maçonnerie ou sur des massifs différents, il peut en effet se produire dans la maçonnerie de légères déformations, des affaissements à peine sensibles, mais suffisants pour créer des dissymétries dans l'entrefer.

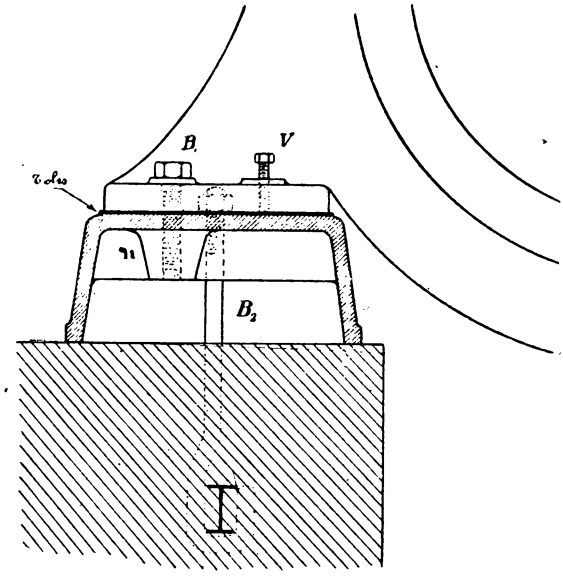


Fig. 43. — Coupe de la plaque de fondation.

On devra donc, lorsqu'il n'y a pas de plaque commune pour la carcasse et les paliers, veiller tout particulièrement à la solidité des fondations et vérifier de temps en temps, pendant l'exploitation, le centrage de l'inducteur.

Pour les petites machines, les paliers peuvent être reliés à la carcasse au moyen de bras en fonte, suivant les dispositions bien connues.

II. Tôles de l'induit

Tôles. — Dans un circuit magnétique parcouru par un flux alternatif, il est indispensable, pour éviter les courants de Foucault, de le constituer avec des tôles isolées entre elles.

Pour les tôles, la considération de perméabilité a relativement peu d'importance car, sauf dans les transformateurs statiques à courants alternatifs, les tôles ne constituent pamais qu'une faible partie du circuit dont la réluctance est très petite devant celle du reste du circuit et surtout de l'entrefer.

Par contre, le phénomène de hystérésis prend, dans les tôles d'induit, une importance capitale.

Calcul des pertes par Hystérésis

On sait que les pertes par hystérésis peuvent se calculer par la formule empirique suivante due à Steinmetz :

$$P_H = \eta f \mathcal{B}_0^{1,6} V \times 10^{-7}$$

P_H = pertes par hystérésis, en watts.

f = fréquence en périodes par seconde.

η = coefficient de Steinmetz (dépendant de la qualité des tôles)

$\mathcal{B}_0$ = induction maxima en gauss

V = volume de fer en cm^3.

η varie de 0,0007 à 0,002.

Pour les induits des alternateurs, on emploie des tôles qui ont le plus souvent $\eta = 0{,}0015$.

Importance du recuit des tôles pour diminuer l'hystérésis. — Les tôles sont en acier doux. Or, si l'acier doux par la trempe perd très peu de sa perméabilité, la force coercitive et par suite l'hystérésis augmente beaucoup. Le cycle d'hystérésis se trouve élargi (fig. 44, cycle en traits pointillés). On doit recuire les tôles après laminage.

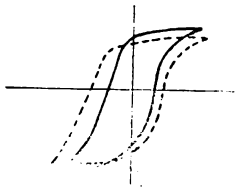


Fig. 44. — Influence de la trempe sur les phénomènes d'hystérésis des tôles d'acier.

Un essai a donné les résultats suivants :

Tôle X : $\eta = 0{,}00323$

La même recuite : $\eta = 0{,}00163$

Vieillissement des tôles. — Il faut avoir quelque méfiance à l'égard de tôles ayant un coefficient d'hystérésis η très faible, car en vieillissant, ces tôles finissent par acquérir un coefficient d'hystérésis beaucoup plus considérable.

Ce phénomène qui a donné lieu à plus d'un mécompte est attribué par diverses personnalités à l'échauffement prolongé des tôles.

Dimensions et épaisseur des tôles. — Les tôles livrées dans le commerce ont ordinairement 1000×1200 mm.

Les tôles de dimensions plus grandes reviennent à un prix très élevé; aussi constitue-t-on les grands circuits magnétiques en plusieurs parties.

L'épaisseur des tôles varie en général de 0,2 à 0,9 mm, elle est souvent de 0,3 (transformateurs) ou 0,5 (machines à courant continu, grands alternateurs).

Cette épaisseur est variable suivant la fréquence de l'aimantation et la valeur de l'induction maxima.

Les pertes par courants de Foucault étant proportionnelles à $\mathcal{E}^2 f^2 \mathcal{B}^2$ ($\mathcal{E}$ épaisseur des tôles), il faudra donc dans le cas de fréquences élevées, pour éviter des pertes trop fortes, employer des tôles de faible épaisseur ou diminuer $\mathcal{B}$; souvent on diminue à la fois $\mathcal{B}$ et $\mathcal{E}$.

Ainsi, dans les induits des alternateurs où la fréquence des variations d'aimantation est en général assez élevée, 50 périodes par seconde ordinairement, on emploie des tôles dont l'épaisseur ne dépasse pas 0,7 mm (dans les grands alternateurs) et des inductions ordinairement inférieures à 8.000 gauss, tandis que dans les génératrices à courant continu où la fréquence d'aimantation dans l'induit ne dépasse pas 20 à 25 périodes par seconde, on peut employer des tôles relativement plus épaisses, même des tôles de plus de 1 mm dans les grandes machines, et des inductions qui atteignent souvent 14.000 à 15.000 gauss.

Isolement des tôles. — On isole en général les tôles entre elles avec du papier Japon (papier de soie) très mince de 0,02 à 0,06 mm d'épaisseur, que l'on colle sur la tôle avec de la gomme laque ou plus souvent avec de la colle d'amidon.

Le coefficient d'utilisation, c'est-à-dire le rapport du volume de fer utile au volume total, est dans ce cas de 88 à 92 %.

On a essayé, pour avoir un meilleur coefficient d'utilisation, d'isoler les tôles par un simple vernis (gomme laque, silicate de potasse, mélange d'asphalte, de benzine et d'huile de lin, etc,), ou par l'oxydation des tôles, mais ce sont là de mauvais procédés, car à la longue les vibrations enlèvent le vernis et l'oxydation.

Calcul des pertes par courants de Foucault

On sait qu'elles sont égales à :

$$P_F = K\left(\mathcal{E}\,\frac{f}{100}\,\frac{\mathcal{B}_0}{1000}\right)^2$$

P_F = pertes par courants de Foucault en watts par Kg. de fer.

$\mathcal{E}$ = épaisseur des tôles en mm.

f = fréquence en périodes par seconde.

$\mathcal{B}_0$ = induction maxima en gauss.

K = C^{te} dépendant de la résistivité $\left\{\begin{array}{l} = 0{,}1645 \text{ Arnold)} \\ = 0{,}1900 \text{ (Kapp)} \end{array}\right.$

Lorsqu'on détermine par expérience les pertes dans le fer sur la machine une fois construite, on trouve pour ces pertes des valeurs toujours plus grandes que celles données par les formules précédentes. Ainsi, d'après Arnold, des essais effectués sur plusieurs dynamos, petites ou grandes, avec induits lisses ou dentés, ont montré que les pertes dans le fer étaient de 1,5 à 4,5 fois supérieures à celles calculées, surtout pour les induits à entailles profondes et fraisées, possédant également des pièces en fonte fortement dimensionnées.

Avec de bonnes tôles et une construction rationnelle de l'induit, on peut compter que les pertes réelles valent de 1,5 à 2,5 fois les pertes calculées. Cette augmentation de pertes provient :

1° De l'inexactitude de la formule de Steinmetz, qui, comme toutes

les formules empiriques, donne des résultats cadrant plus ou moins avec la réalité.

2° Des courants de Foucault supplémentaires dans les tôles provenant :

D'abord de défauts d'isolement entre les tôles. A cet effet, il est bon de placer entre deux tôles, tous les 3 ou 4 cm., un papier plus fort ou une feuille de papier de presspahn ou de fibre;

Ensuite et surtout de ce qu'en fraisant et en limant les dents, on produit des bavures qui, mettant en contact les tôles entre elles, déterminent des circuits fermés.

Les pertes qui en résultent sont très considérables, pouvant augmenter les pertes calculées du double ou même du triple.

Pour éviter ces pertes, il est préférable d'employer des tôles telles qu'elles sortent de la poinçonneuse.

3° Des courants de Foucault dans les pièces en fonte voisines des tôles et dans les boulons de serrage.

Découpage et poinçonnage des tôles. — Les tôles de grandes dimensions ou qui ne doivent être employées qu'en petites quantités, sont découpées à la cisaille. Pour la fabrication courante, les tôles sont ordinairement poinçonnées en un ou plusieurs coups et sortent rapidement découpées à la forme voulue avec tous les trous des encoches et des boulons. Le poinçonnage des tôles, qui permet d'obtenir une très grande rapidité de fabrication avec beaucoup de précision, exige des poinçons et des matrices d'un prix très élevé, dont la dépense ne peut être justifiée que si elle peut être amortie par l'importance de la quantité de tôles à poinçonner de la même façon.

Les encoches qui doivent recevoir les conducteurs peuvent être faites de plusieurs façons :

1° En perçant, en mortaisant ou en fraisant les tôles une fois empilées et serrées;

2° En poinçonnant les tôles séparément encoche par encoche;

3° En poinçonnant dans une tôle plusieurs encoches ou même toutes les encoches à la fois, en même temps que se fait le découpage de la tôle.

Le premier procédé, d'ailleurs employé exceptionnellement à l'heure actuelle, n'est pas très recommandable, car il est difficile

avec lui d'éviter des bavures réunissant les tôles entre elles et produisant des pertes de courant de Foucault importantes.

Le découpage ou le poinçonnage des tôles peut se faire avant ou après l'isolation des tôles; presque toujours il se fait après l'isolation, bien qu'il en résulte une usure plus grande des poinçons.

Disposition des tôles de l'induit. — Production d'une force électromotrice dans l'arbre avec les induits en plusieurs parties. — Les tôles découpées en segments (sauf dans le cas des petits alternateurs où l'on peut employer des tôles d'une seule pièce à condition

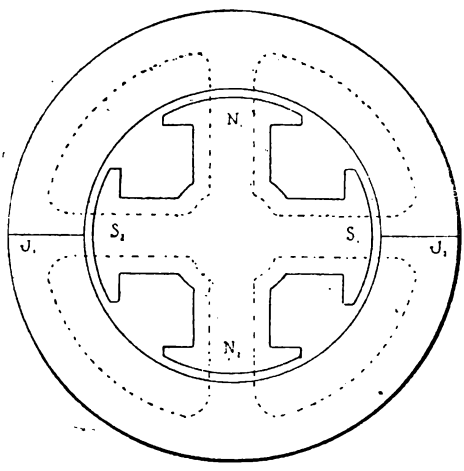


Fig. 45. — Les flux sont les mêmes dans les quatre parties de l'induit pour cette position de l'inducteur.

que le diamètre extérieur de l'induit ne dépasse guère un mètre) sont empilées les unes sur les autres en croisant les joints.

Avec les machines de grand diamètre, il est indispensable, pour permettre le transport et faciliter les réparations, de faire l'induit en plusieurs parties. Il en résulte parfois, surtout pour les turbo-alternateurs, la production d'une force électromotrice induite dans l'arbre provenant de la dissymétrie magnétique créée par le petit entrefer qui existe nécessairement aux joints des parties de l'induit, quel que soit le soin apporté à la confection de ces joints.

En pratique, un semblable joint correspond, en effet, à un entrefer d'un quart de millimètre environ.

Si l'on considère une machine à 4 pôles avec un induit en deux pièces, il est évident que, pour la position de l'inducteur représentée figure 45, les flux seront partout les mêmes, tandis que, dans le cas de la figure 46, les flux traversant l'induit seront plus grands de N_1 à S_1 et de N_2 à S_2 que de N_1 à S_2 et de N_2 à S_1, car ces deux derniers flux ont à traverser les joints J_1 et J_2.

Pour tenir compte de ces différences dans les flux, on peut supposer que tout se passe comme s'il existait quatre flux égaux Φ,

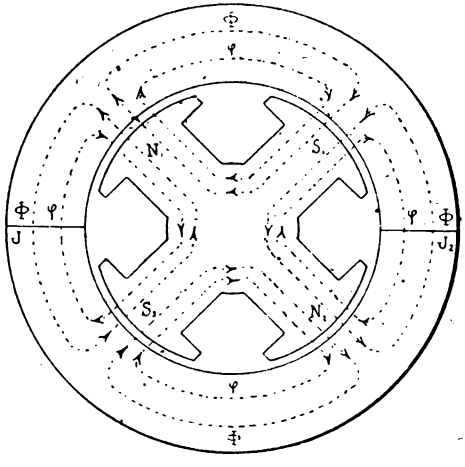


Fig. 46. — Les flux dans l'induit ne sont pas tous les mêmes à cause des joints J_1 et J_2.

représentant les flux principaux et quatre petits flux φ égaux aussi dirigés dans le sens des flèches (fig. 46).

Les flux dans l'inducteur sont donc les suivants :

	Pour la position de la fig. 46	Après une rotation de l'inducteur de 90°
Flux N_1S_1	$\Phi + \varphi$	$\Phi - \varphi$
Flux S_1N_2	$\Phi - \varphi$	$\Phi + \varphi$
Flux N_2S_2	$\Phi + \varphi$	$\Phi - \varphi$
Flux S_2N_1	$\Phi - \varphi$	$\Phi + \varphi$

En ne considérant que les flux φ, on voit facilement sur la figure 47 que l'on peut admettre l'existence d'un flux φ entourant l'arbre et changeant de sens pour une rotation de 90° de l'inducteur. Ce flux φ alternatif produit donc dans l'arbre une force électromotrice alternative de *même fréquence* que le courant débité par l'alternateur.

La même étude entreprise pour différents nombres de pôles conduit à la règle suivante :

Si 2 p *représente le nombre de pôles d'une machine et* n *le nombre*

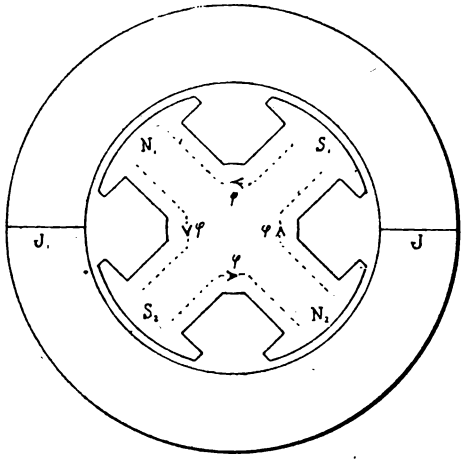


Fig. 47. — A cause des joints J_1 et J_2 tout se passe comme s'il existait un flux alternatif φ entourant l'arbre.

de parties du stator, il y aura production d'une force électromotrice dans l'arbre lorsque $\frac{2p}{n}$ *sera un nombre entier et pair.*

Comme la force électromotrice dans l'arbre est d'autant plus grande que le flux par pôle est plus considérable, il en résulte que ce sera surtout dans les turbo-alternateurs que cette force électromotrice sera importante et pourra atteindre plusieurs volts.

Cette force électromotrice détermine un courant qui se ferme par les paliers et le bâti malgré la couche d'huile entourant l'arbre dans les coussinets. Ceux-ci sont piqués et les pertes augmentent par suite du passage de ce courant. On est obligé d'isoler les paliers, ce qui constitue un grave inconvénient surtout pour les turbo-alternateurs,

qui doivent posséder des paliers très rigides et utiliser le graissage sous pression.

Pour éviter l'isolation des paliers, le meilleur moyen sera de choisir le nombre de joints de façon que $\frac{2p}{n}$ ne soit pas un nombre pair, et de faire en sorte que la résistance magnétique soit la même pour tous les joints. On ne sera pas obligé évidemment de couper la carcasse de l'induit pour chaque joint.

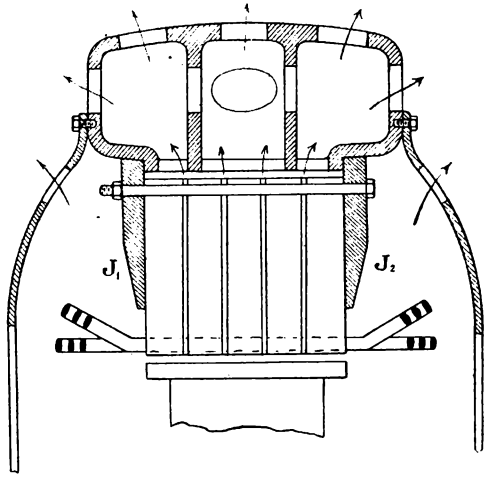


Fig. 48. — Coupe d'une carcasse avec les deux joues de serrage indépendantes. Enroulement à deux étages de bobines.

Fixation et serrage des tôles. — Les tôles sont supportées par la carcasse et maintenues serrées, le plus souvent au moyen de boulons, entre deux joues en fonte J_1 et J_2. Les figures 48, 49, 50 et 51, qui représentent des coupes de carcasses par un plan passant par l'arbre, montrent les principales dispositions adoptées. Sur la figure 48, les deux joues sont indépendantes de la carcasse; elles peuvent être en plusieurs segments, comme les tôles, qui sont alors maintenues à la carcasse par des queues d'aronde (fig. 54). Sur les figures 49 et 50, la joue J_1 est venue de fonte avec la carcasse, tandis que la joue J_2 est indépendante. Enfin la figure 51 montre une carcasse en deux parties, chacune possédant une joue venue de fonte avec elle.

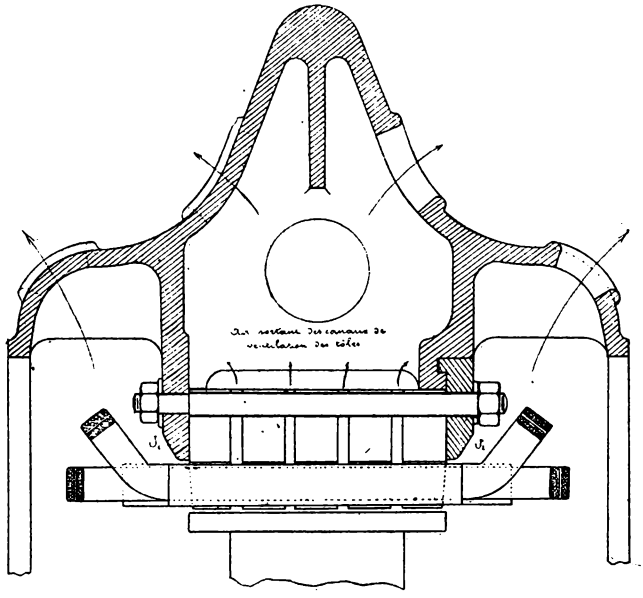


Fig. 49. — Coupe d'une carcasse avec une joue de serrage indépendante
Enroulement à deux étages de bobines

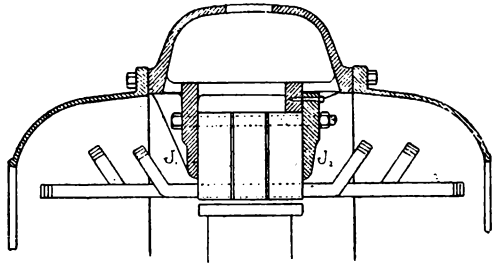


Fig. 50. — Coupe d'une carcasse avec une joue de serrage indépendante.
Enroulement à trois étages de bobines pour haute tension (5000 à 10000 volts).

Un bon serrage des tôles est indispensable pour éviter que les variations de l'induction magnétique ne produisent dans les tôles des vibrations trop fortes et un ronflement trop considérable.

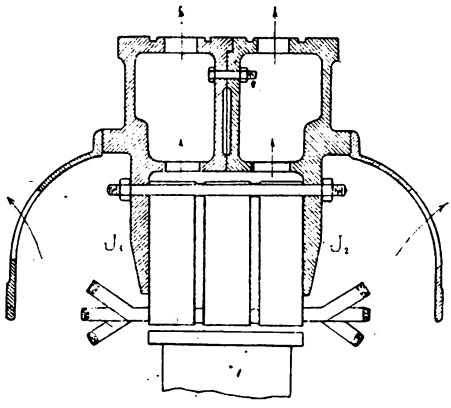


Fig. 51. — Coupe d'une carcasse en deux parties. Enroulement à trois étages de bobines.

De distance en distance, tous les dix centimètres environ, on ménage entre les tôles un canal de ventilation.

Pour maintenir rigide tout l'ensemble des tôles, on place aux deux extrémités et entre les canaux de ventilation des tôles d'une épais-

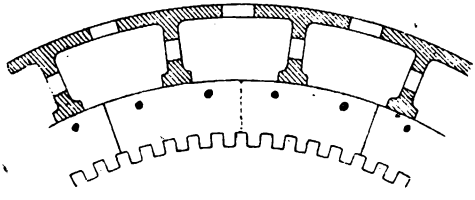


Fig. 52. — Coupe d'une carcasse par un plan perpendiculaire à l'arbre.

seur beaucoup plus forte, variant de 2 à 5 millimètres, suivant l'importance de la machine.

Dans le cas des alternateurs monophasés, les vibrations étant plus fortes, il faut veiller à ce que les tôles extrêmes ne soient pas trop

faibles, car elles peuvent parfois être insuffisantes pour empêcher les vibrations des dents qui finissent à la longue par se briser tôle par tôle.

Les figures 52, 53 et 54 représentent schématiquement des coupes de carcasses par un plan perpendiculaire à l'arbre. Comme on le

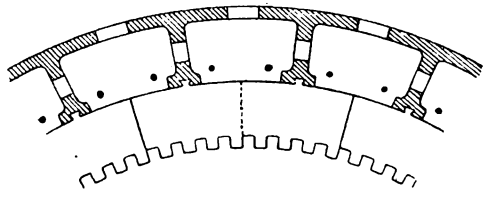


Fig. 53. — Coupe d'une carcasse par un plan perpendiculaire à l'arbre. Les boulons de serrage sont en dehors des tôles qui sont maintenues à la carcasse par des queues d'aronde.

voit facilement, le flux d'induit ne peut se fermer par la carcasse, à moins de suivre les nervures *n* et le dos de la carcasse, ce qui représente un circuit très long et très réluctant.

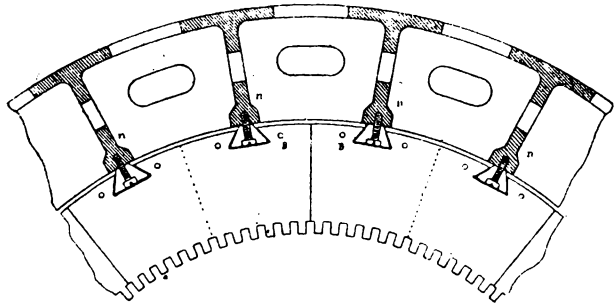


Fig. 54. — Coupe d'une carcasse par un plan perpendiculaire à l'arbre.

Sur la figure 45 les tôles de l'induit portent des queues d'aronde qui viennent se loger dans des rainures faites dans les nervures *n* de la carcasse. Les boulons B ne traversent pas les tôles.

Les queues d'aronde peuvent être au contraire découpées dans les tôles qui sont alors maintenues à la carcasse par des règles en acier vissées sur les nervures *n* (fig. 46).

Courants de Foucault dans les boulons de serrage des tôles. Moyens employés pour les éviter. — Les tôles de l'induit sont, nous l'avons vu, fixées à la carcasse par des boulons.

Ces boulons constituent, avec les tôles et la carcasse, des circuits qui, étant soumis à des variations de flux, pourront être le siège de courants assez intenses.

Considérons par exemple le circuit formé par un boulon et la carcasse de l'induit, circuit représenté schématiquement par la figure 55.

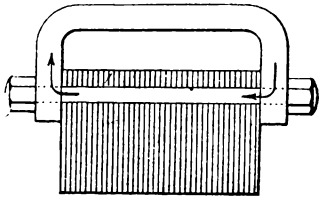


Fig. 55. — Courants de Foucault prenant naissance dans les boulons et se fermant par la carcasse.

Une partie du flux inducteur passe dans ce circuit et le coupe par conséquent.

Le courant qui prendra alors naissance dans ce circuit engendrera un flux opposé au flux utile, et par suite s'opposera au passage de ce dernier.

La section offerte au passage du flux utile alors réduite à la partie comprise entre le boulon et l'entrefer, peut être assez petite et par suite l'induction y devenir très considérable.

Dans ces conditions, les pertes par hystérésis et courants de Foucault augmentent beaucoup, d'où échauffement des tôles et, de plus, les courants qui traversent les boulons y développent aussi de la chaleur, d'où mauvais fonctionnement et mauvais rendement de l'alternateur.

On peut avoir de la manière suivante (indiquée par M. Boucherot dans ses belles conférences à l'E. S. E.) (1) une idée de l'importance des courants circulant dans les boulons.

L'expérience montre que, pour le fer, il faut par centimètre une force magnétomotrice de :

2,5	ampères-tours	pour une	induction de	5.000 gauss.
5	—	—	de	10.000 —
8	—	—	de	12.000 —
25	—	—	de	15.000 —
45	—	—	de	16.000 —

(1) Ecole Supérieure d'Electricité de Paris.

Comme le flux contraire, produit par le courant du boulon, fait équilibre sensiblement au flux de l'inducteur qui passe entre le boulon et la carcasse, si le diamètre du boulon est par exemple de 2 centimètres, il faudra au moins, pour produire le flux antagoniste

$$2 \times 2{,}5 = 5 \text{ ampères-tours maxima}$$

si l'induction est de 5.000 gauss, et

$$2 \times 45 = 90 \text{ ampères-tours maxima}$$

si cette induction est de 16.000.

C'est-à-dire qu'il circulera dans le premier cas environ 5 ampères, ce qui est acceptable, et dans le second 90 ampères, ce qui est énorme.

D'où la nécessité de placer les boulons le plus près possible du bord extérieur des tôles pour qu'ils soient dans une région où l'induction se trouve être très faible, et pour laisser au flux utile une

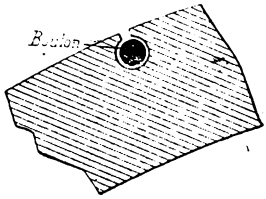


Fig. 56.

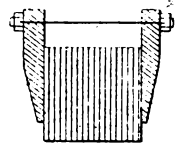


Fig. 57.

Tôles ouvertes et boulons extérieurs, pour atténuation des flux passant derrière les boulons.

place suffisante, car la partie située après les boulons est perdue au point de vue magnétique. On ne laisse en général que 4 ou 5 millimètres entre le bord des boulons et celui des tôles. Souvent, on ouvre les tôles, comme l'indique la figure 56, pour créer une grande reluctance aux dérivations du flux passant derrière les boulons.

On peut aussi isoler les boulons et, dans ce cas, il est possible de les placer au centre des tôles; mais la première disposition est bien préférable, car, lorsque l'on isole les boulons, l'isolant facilite bien le passage de ces boulons au moment du montage, mais le serrage des tôles est mal assuré, celles-ci pouvant avoir un certain jeu, ce qui est très mauvais.

Dans les grandes machines, pour les turbo-alternateurs surtout, on peut mettre les boulons de serrage en deux rangées : une au centre, isolée, et l'autre à la périphérie, non isolée. Les premiers serrent les tôles, les autres assurent la rigidité du circuit magnétique.

Quelques constructeurs disposent même les boulons complètement en dehors des tôles, mais très près de celles-ci (fig. 57).

Les boulons placés en dehors des tôles ou très près du bord extérieur de celles-ci n'ont pas besoin d'être isolés. Ils peuvent donc donner un serrage très énergique.

Pertes par courants de Foucault dans les boulons de serrage des tôles

Lorsque les boulons de serrage des tôles traversent celles-ci, ils forment avec les tôles les flasques et la carcasse des circuits fermés dans lesquels prennent naissance des courants de Foucault (fig. 58).

Lorsque l'induction des boulons est faible, ces courants de Foucault sont négligeables et il est inutile de prendre des précautions spéciales, mais lorsque l'induction est assez élevée, il n'en est plus

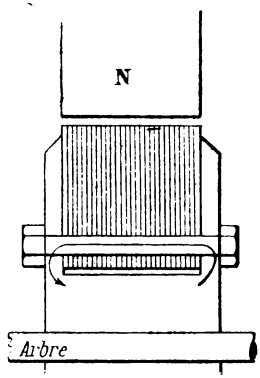


Fig. 58. — Création de courants de Foucault dans les boulons de serrage des tôles.

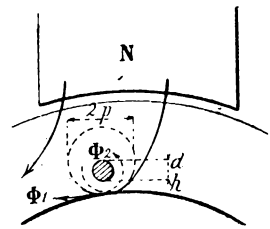


Fig. 59. — Calcul des pertes dans les boulons non isolés.

de même et l'on doit isoler les boulons par rapport aux tôles et aux flasques.

Calcul des pertes dans les boulons non isolés. — Supposons (fig. 59) un induit dans lequel les tôles sont serrées par des boulons en métal non magnétique, le bronze par exemple. Le boulon est le siège d'un courant alternatif d'une fréquence de $\frac{pN_1}{60}$ périodes par seconde.

p nombre de paires de pôles;
N_1 nombre de tours par minute.

Soit :

$\mathcal{B}_0$ l'induction maxima dans l'induit;
l, la largeur de l'induit en cm.;
Φ_1 le flux coupé par le boulon en se déplaçant d'un angle $\frac{2\pi}{2p}$;
I_{eff}, l'intensité efficace en ampères dans le boulon;
R, la résistance ohmique du boulon en ohms;
μ, la perméabilité du fer environnant.
On a évidemment :

$$\frac{d\Phi_1}{dt} = Ri + \mathcal{L}\frac{di}{dt}$$

i étant le courant instantané dans le boulon et $\mathcal{L}$ la self-induction du circuit comprenant le boulon.

Comme Ri est très faible devant $\frac{\mathcal{L}\, di}{dt}$, on a sensiblement :

$$\frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{d\,\mathcal{L}i}{dt} = \frac{d\Phi_2}{dt}$$

d'où :

$$\Phi_1 = \Phi_2$$

Ainsi, le courant qui prend naissance dans le boulon produit un flux Φ_2 opposé au flux utile Φ_1, et l'intensité de ce courant est déterminée par la condition que Φ_2 égale sensiblement Φ_1.

Cherchons donc l'intensité nécessaire pour produire Φ_2. D'après la loi classique de Biot et Savart, le champ magnétique produit par un courant i circulant dans un conducteur rectiligne indéfini, a pour valeur en un point situé à une distance x de l'axe du conducteur

$$\mathcal{H} = \frac{2i}{x}$$

On aura donc pour la valeur du flux dans un cylindre très mince d'épaisseur dr, de rayon r et de longueur l, entourant le boulon :

$$d\Phi_2 = \mu \frac{2I_{eff}\sqrt{2}}{r \times 10} l\, dr$$

Nous avons multiplié par $\sqrt{2}$ pour avoir la valeur maximum de I,

d'où $$\Phi_2 = \frac{2\,\mu\, I_{eff}\sqrt{2}}{10} l\, log\, \frac{2r}{d}$$

et finalement comme $\Phi_2 = \Phi_1 = \mathcal{B}_0\, h\, l$

$$Ieff = \frac{\mathcal{B}_0 h}{0{,}65\,\mu\, log\, \frac{2r}{d}}$$

Application :

$\mathcal{B}_0 = 14.000$ gauss
$l = 30$ cm
$h = 2{,}5$ cm
$\mu = 1000$
$d = 2{,}5$ cm
$r = 5$ cm

On a :

$$I_{eff} = \frac{14.000 \times 2,5}{0,65 \times 1000 \times 0,6} = 97 \text{ amp. eff.}$$

$$R = 2 \frac{30}{\frac{2,5^2 \times 3,14}{4}} 10^6 = 1,22\ 10^{-5} \text{ ohms}$$

d'où :

$$RI^2_{eff} = 0,115 \text{ watt (ce qui est négligeable).}$$

On aurait eu une perte beaucoup plus forte dans le boulon :

1° Si l'induction avait été plus élevée;

2° Si le boulon avait été en fer (parce que R aurait été plus grand et que d'autre part, par suite de la perméabilité du boulon, l'induction aurait été plus grande). Aussi emploie-t-on très souvent des boulons en bronze;

3° Si le boulon avait été placé plus loin du bord intérieur (r plus grand).

Remarque. — Le courant qui circule dans le boulon ne détermine pas seulement une simple perte par effet Joule, mais en produisant un flux Φ_2 égal et sensiblement opposé au flux utile Φ_1, il annule l'effet utile de celui-ci et réduit ainsi la section utile de l'induit à celle existant entre le boulon et l'entrefer. L'induction, dans cette section, doit alors être augmentée, et par suite les pertes dans le fer croissent aussi.

C'est surtout pour ne pas trop diminuer la section utile du flux que l'on place le boulon le plus près possible du bord intérieur de l'induit.

Si l'on isole les boulons, on peut les placer au centre des tôles, mais le serrage étant alors mal assuré, les tôles pouvant prendre un certain jeu, il est préférable de ne pas employer ce dispositif.

Détermination industrielle des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans un échantillon de tôle. — Dans les usines de construction, on mesure souvent ces pertes de la façon suivante :

On forme avec les tôles à essayer un circuit magnétique fermé

sur lequel on dispose un enroulement. On envoie dans cet enroulement un courant alternatif de fréquence f et d'intensité I_{eff}. On règle I_{eff} de façon à obtenir dans les tôles une induction maximum $\mathcal{B}_0$ déterminée. Cette induction est facile à calculer en fonction de I_{eff} lorsqu'on connaît la perméabilité.

On mesure ensuite au wattmètre la puissance perdue dans l'enroulement en déduisant de cette puissance la perte par effet Joule dans l'enroulement ou la perte par hystérésis ou courants de Foucault pour une fréquence f avec induction $\mathcal{B}_0$ et un poids donné de fer.

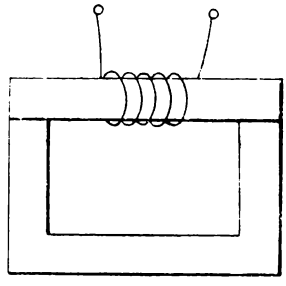


Fig. 60. — Détermination industrielle des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans un échantillon de tôle.

En général, on mesure ces pertes en faisant $B_0 = 10.000$ gauss et $f = 50$ périodes par seconde.

Dans ces conditions, pour des tôles de 0,5 $^{m}/_{m}$ d'épaisseur, la perte ne doit pas dépasser 3 watts par kg pour des tôles ordinaires.

Pour séparer les pertes par hystérésis de celles par courants de Foucault, il suffit de faire varier la fréquence comme par exemple dans la méthode d'Housman.

On a en effet, $\mathcal{B}_0$ étant constant :

Pertes dans le fer par kg :

$$p = C_1 f + C_2 f^2$$

$C_1 f = P_H$ (Hystérésis)

$C_2 f^2 = P_F$ (courants de Foucault)

on peut écrire :

$$\frac{p}{f} = C_1 + C_2 f$$

d'où le graphique (fig. 61).

Echauffement des tôles. — Pour éviter qu'un échauffement trop considérable des tôles n'amène à la longue la destruction de l'iso-

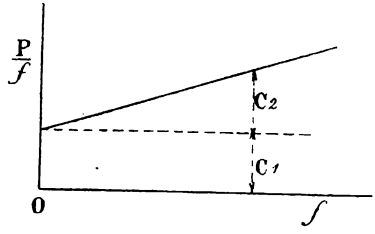


Fig. 61. — Séparation dans les tôles des pertes par hystérésis et par courants de Foucault.

lant qui les sépare et n'augmente la température des conducteurs voisins, il est prudent que la surélévation de température des tôles ne dépasse pas de 60 à 65° la température ambiante, à condition que celle-ci ne dépasse pas elle-même 35°.

A cet effet, dans les circuits magnétiques un peu considérables, on dispose les tôles en plusieurs paquets de 6 à 10 cm d'épaisseur, séparés les uns des autres par des intervalles de 10 à 15 mm. Chaque paquet est limité par une tôle maîtresse de 1 à 2 mm d'épaisseur au maximum et les paquets extrêmes par une tôle de 3 à 6 mm dont

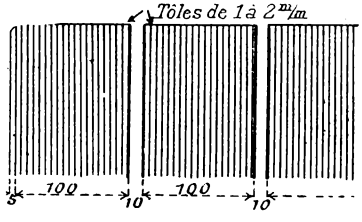


Fig. 62. — Dispositifs pour diminution de l'échauffement des tôles.

le bord est taillé en biseau pour réduire les courants de Foucault.

Les paquets sont écartés entre eux soit au moyen de fer ou de cuivre en U (fig. 63) ou d'S rivés aux tôles (fig. 64), soit surtout actuelle-

ment en perforant les tôles maîtresses et en relevant perpendiculairement à ces tôles les sortes de volets ainsi formés (fig. 65).

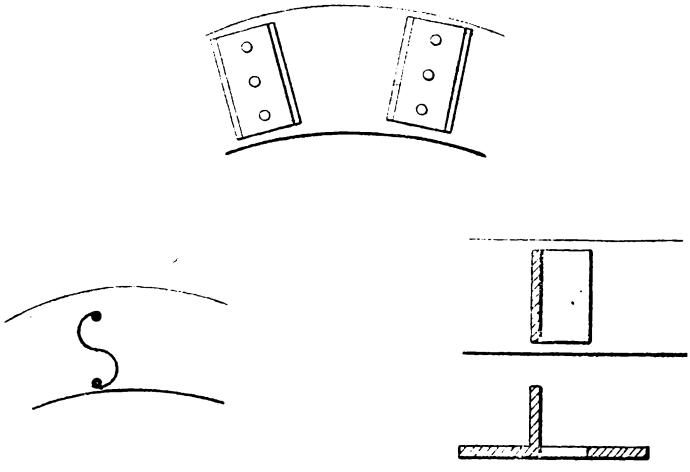


Fig. 63, 64 et 65. — Dispositifs pour diminution de l'échauffement des tôles.

Induits lisses, induits dentés. — L'induit lisse n'est plus du tout employé à l'heure actuelle pour les alternateurs, car il présente les inconvénients suivants :

1° Difficulté de fixation des conducteurs. Cette fixation est pratiquement impossible lorsque l'induit est extérieur à l'inducteur;

2° Les efforts mécaniques dus aux actions électrodynamiques agissent directement sur les conducteurs, tandis que, dans le cas des induits dentés, les efforts s'exercent surtout sur les dents;

3° Enfin, à cause des grandes fréquences ordinairement employées pour le courant alternatif, il faudrait prendre du fil très fin (2 à 3 millimètres de diamètre au maximum) pour éviter des courants de Foucault exagérés dans les conducteurs.

L'induit lisse a, par contre, comme principal avantage de permettre d'obtenir facilement des courbes de force électromotrice sinusoïdales.

Pour toutes ces raisons, les induits dentés, ou induits à encoches, sont à l'heure actuelle exclusivement employés.

Forme des encoches. — On distingue trois sortes d'encoches :

1° Les encoches complètement fermées. — Elles ont l'avantage :

a) De préserver complètement les conducteurs induits des courants de Foucault et de la force électrodynamique.

b) De permettre, en évitant les harmoniques de dentures, d'obtenir plus facilement une force électromotrice sinusoïdale.

c) De rendre possible l'emploi de pôles massifs, tandis qu'avec les encoches ouvertes il faut des pôles feuilletés.

Par contre, elles ont les inconvénients suivants, savoir :

a) De donner une grande self-induction, d'où une grande chute de tension, car le flux propre des conducteurs de l'induit peut se fermer entièrement par le fer de l'induit, comme le montrent sur la figure 66 les lignes de forces en pointillé qui entourent l'encoche.

b) D'obliger à faire l'enroulement à la main sur la machine même, au lieu d'employer les bobines faites d'avance sur gabarit.

A cause de ces inconvénients, du premier surtout, cette forme d'encoche est, depuis une dizaine d'années, complètement abandonnée pour les alternateurs ordinaires.

Elle a été très employée vers 1900, principalement par MM. Brown-Boveri et C^ie^, la Société Lahmeyer de Francfort, la Société l'Eclairage Electrique, etc.

Pour les turbo-alternateurs, les encoches complètement fermées présentent un réel intérêt et seront sans doute adoptées de préférence par bien des constructeurs. La Société d'Electricité A. E. G., notamment, les emploie depuis quelques années. Dans ces machines, en effet, la réaction d'induit est de beaucoup la cause la plus impor-

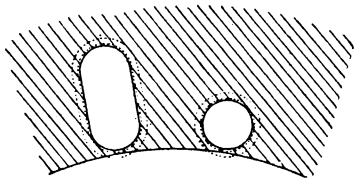


Fig. 66. — Encoches fermées d'induit.

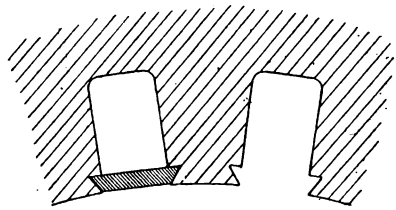


Fig. 67. — Encoches ouvertes d'induit.

tante de la chute de tension, car la self-induction des conducteurs de l'induit est relativement faible. On peut donc avantageusement augmenter celle-ci pour limiter la surintensité considérable qui se produit pendant un temps très court au moment d'un court-circuit sans accroître beaucoup la chute de tension.

2° Les Encoches complètement ouvertes. — *Avantages.* — Faible self-induction des conducteurs de l'induit. Possibilité d'employer des bobines faites d'avance sur gabarit. C'est là un avantage très important qui permet de réduire d'une façon assez sensible le prix de revient de la machine, et en outre facilite beaucoup les réparations. Les conducteurs sont maintenus dans les encoches par des clavettes en bois que l'on glisse dans de petites rainures creusées à l'extrémité des dents (fig. 67).

Inconvénients. — *a*) Production d'harmoniques de denture. Ces harmoniques sont dues à ce que le nombre des dents servant au passage du flux dans l'induit n'est pas toujours le même devant les pôles inducteurs.

Il en résulte des variations de réluctance, et par suite des variations de flux très rapides.

On voit, en effet, que la réluctance des dents est plus grande lorsque le pôle se trouve dans la position de la figure 69 que lorsqu'il est dans la position de la figure 68.

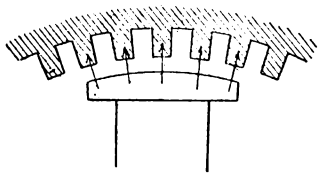


Fig. 68.

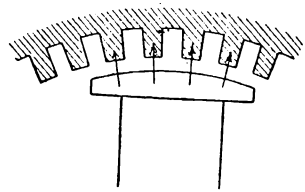


Fig. 69.

Production d'harmoniques de denture dans le cas d'encoches complètement ouvertes.

Ces variations de réluctance, qui dépendent du nombre d'encoches, sont évidemment bien moins sensibles avec des encoches complètement fermées.

On peut atténuer ces variations de flux en réduisant la largeur des encoches, en augmentant leur nombre et surtout en prenant un entrefer très grand, pour permettre aux lignes de force, sortant des pôles, de s'épanouir plus facilement et pour rendre les variations de réluctance dues aux dents négligeables devant la réluctance totale du circuit magnétique;

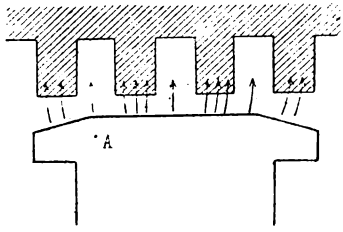


Fig. 70. — Production de courant de Foucault dans les pièces polaires.

b) Production de courants de Foucault dans les pièces polaires, à cause de la répartition inégale du flux (fig. 70) due à la réluctance des encoches. L'induction est plus forte en face des dents que devant les encoches.

Par suite du déplacement de l'inducteur, on a dans les pôles des variations d'induction de faible amplitude, mais de fréquence très élevée, celle-ci dépendant du nombre d'encoches.

Si l'on considère un point A d'une pièce polaire, pendant la durée d'une période T, l'induction au point A aura varié n fois (n étant le nombre d'encoches par paire de pôles) et en une seconde

$$n \frac{1}{T} = nf$$

fois (f étant la fréquence du courant débité par l'alternateur).

Pour éviter, dans les pôles inducteurs, la production de courants de Foucault assez intenses pouvant donner lieu à une perte notable d'énergie, on sera obligé de feuilleter les pièces polaires.

On peut de même augmenter l'entrefer pour diminuer l'importance de ces variations de flux.

Malgré ces inconvénients, les encoches complètement ouvertes sont actuellement les plus employées, surtout en Amérique, à cause de l'avantage considérable signalé plus haut de permettre l'emploi de bobines faites d'avance sur gabarit.

3° Les encoches a demi fermées. — Elles possèdent, atténués,

les avantages et les inconvénients des deux formes d'encoches précédentes.

Les alternateurs avec encoches à demi fermées (fig. 71), que l'on construisait beaucoup il y a quelques années, semblent devoir céder la place aux alternateurs à rainures complètement ouvertes.

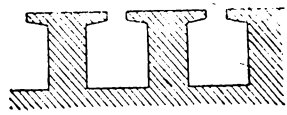


Fig. 71. — Encoches demi-fermées d'induit.

Nombre d'encoches par pôle. — Ce nombre n'est pas indifférent.

Avantages d'un grand nombre d'encoches par pôle. — *a*) Avec un grand nombre d'encoches par pôle, les harmoniques de denture ont une fréquence plus grande, mais leur amplitude est plus faible. On peut donc les étouffer plus facilement;

b) Il en est de même pour les courants de Foucault dans les pièces polaires. On peut les réduire beaucoup dans ce cas en augmentant simplement l'entrefer;

c) On peut obtenir une force électromotrice plus sinusoïdale. Avec une seule bobine par pôle, le flux varie trop brusquement dans cette bobine, et l'on a une courbe de force électromotrice analogue à celle de la figure 72, tandis qu'avec deux bobines, par exemple, légèrement décalées l'une par rapport à l'autre, on a, pour représenter la force électromotrice résultante, une courbe plus voisine de la sinusoïde, et représentée en trait plein figure 73.

Inconvénients d'un trop grand nombre d'encoches par pôle. — *a*) La construction de la machine est plus coûteuse;

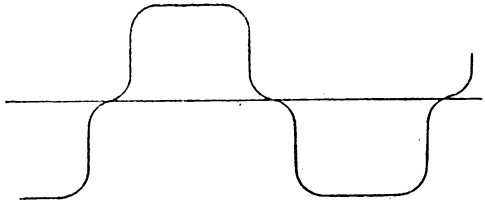


Fig. 72. — Force électromotrice en escalier dans le cas d'une seule bobine par pôle.

b) L'isolement de l'enroulement est plus difficile à réaliser à cause de la multiplicité des bobines;

c) Pour un même poids de cuivre induit, la force électromotrice est plus faible à cause du coefficient de réduction du bobinage, qui est d'autant plus petit que le nombre d'encoches par pôle est plus grand. Cet inconvénient est, en pratique, peu important, car la dimi-

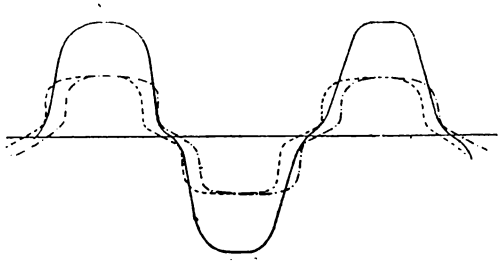


Fig. 73. — Amélioration de la force électromotrice avec deux bobines par pôle.

nution du coefficient de réduction avec le nombre d'encoches est très faible. Ce coefficient de réduction est, en effet, égal à 1 pour une encoche, à 0,966 pour deux encoches, à 0,960 pour trois encoches (1).

Nombre d'encoches par pôle ordinairement adopté. — Dans les alternateurs monophasés et triphasés, le nombre d'encoches par pôle est égale à 6, 9, 12, 15 et même 18 dans les turbo-alternateurs.

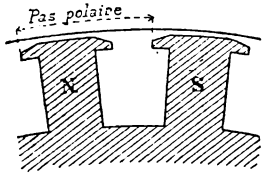


Fig. 74.
Définition du pas polaire.

Pour pouvoir placer un grand nombre d'encoches, il faut une place suffisante sur l'induit, c'est-à-dire un grand pas polaire (fig. 74).

C'est ce qui a lieu surtout pour les alternateurs volants (dans lesquels, pour avoir un grand moment d'inertie, on prend un diamètre beaucoup plus grand qu'il serait nécessaire au seul point de vue électrique) et pour les turbo-alternateurs (pour lesquels le

(1) Voir le calcul du coefficient de réduction dans le fascicule, *Les Alternateurs industriels, constitution, fonctionnement, calcul.* (Bibliothèque de l'Ingénieur Electricien.)

nombre de pôles est relativement très restreint par rapport au diamètre).

Comme on le voit, le nombre d'encoches doit toujours être un multiple de 3.

Pour le triphasé, la raison en est évidente. Pour le monophasé, c'est afin de pouvoir transformer éventuellement l'alternateur monophasé en alternateur triphasé.

Dans le cas du monophasé, on n'utilise jamais que les deux tiers des encoches. On n'a pas, en effet, intérêt à utiliser toutes les encoches, car, dans ce cas, le coefficient de réduction du bobinage étant petit, l'augmentation de force électromotrice que l'on pourrait obtenir ainsi serait trop faible devant l'accroissement du prix de revient de la machine et la diminution du rendement due aux pertes par effet Joule dans les conducteurs mal utilisés.

Dans les alternateurs diphasés, le nombre d'encoches par pôle est égal à 4, 6, 8, le nombre d'encoches devant évidemment être pair.

ENROULEMENTS EMPLOYÉS PRATIQUEMENT POUR L'INDUIT

On peut ranger les enroulements en trois grandes classes :

1° *Enroulements avec bobines séparées.* — Employés toujours pour la haute tension, et très souvent pour la basse tension lorsque l'intensité n'est pas trop grande, dans le cas des moteurs asynchrones surtout;

2° *Enroulements avec bobines enchevêtrées.* — Utilisés dans le cas de la moyenne et de la basse tensions lorsque l'intensité n'est pas trop forte;

3° *Enroulements avec barres.* — Employés pour la basse tension et dans le cas d'intensités un peu grandes.

Pour tous les schémas d'enroulement qui suivront, l'induit sera supposé coupé par un plan passant par l'arbre puis développé sur un plan. Pour se rendre compte de la disposition exacte des conducteurs, il suffit de prendre la feuille de papier sur laquelle est repré-

senté le schéma et de l'enrouler pour former un cylindre à l'intérieur duquel on supposera tourner l'inducteur.

Remarques sur les bobines longues et les bobines courtes. — Autrefois, on distinguait deux catégories de bobines :

Les bobines longues (fig. 75), dans lesquelles les deux faisceaux de conducteurs AB et CD coupent en même temps le flux inducteur.

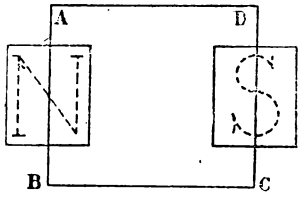


Fig. 75. — Bobine longue.

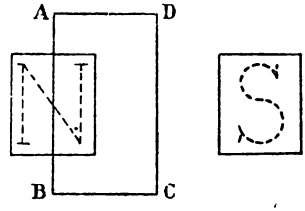


Fig. 76. — Bobine courte.

Les bobines courtes (fig. 76), dans lesquelles le flux inducteur n'est jamais coupé à la fois que par un seul faisceau de conducteurs, AB par exemple.

Comme on le voit facilement, les conducteurs sont mieux utilisés dans les bobines longues que dans les bobines courtes, puisque, avec une longueur de fils qui est loin d'être deux fois plus grande, l'on a une force électromotrice sensiblement deux fois plus élevée dans la bobine longue que dans la bobine courte.

C'est pour cette raison que l'on n'emploie plus actuellement que des bobines longues.

1° Enroulements avec bobines séparées

Alternateurs monophasés. — L'enroulement représenté par la figure 77 (enroulement I) est le plus souvent employé.

L'enroulement représenté figure 78 est possible, mais il est moins avantageux, parce qu'il faut, dans l'exemple choisi, quatre formes de bobines, au lieu de deux avec l'enroulement I, et parce que les deux bobines extrêmes sont plus grandes, ce qui augmente la résistance de l'induit et l'encombrement de la machine.

Néanmoins, comme on le verra, l'enroulement de la figure 62 est adopté lorsqu'on veut avoir des induits avec coupures, c'est-à-dire

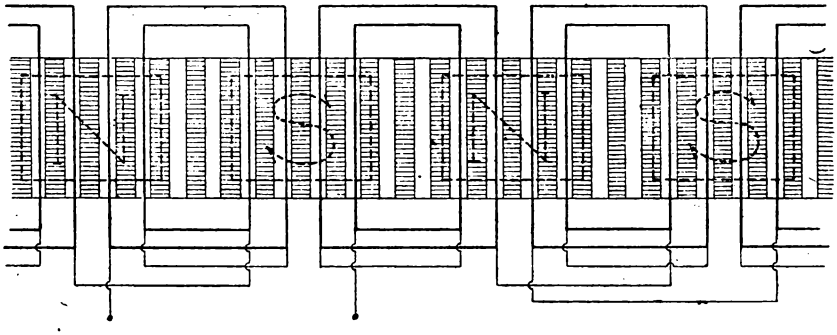


Fig. 77. — Enroulement I. — Alternateur monophasé avec bobines longues.

des induits qu'il est possible de diviser en plusieurs pièces sans être obligé d'enlever une bobine de l'induit.

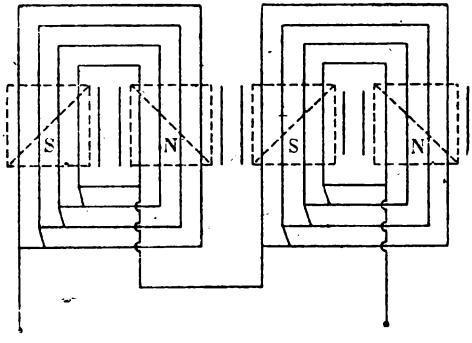


Fig. 78. — Enroulement (peu employé) dit à pôles conséquents.

L'enroulement de la figure 62 est souvent appelé *enroulement à pôles conséquents,* parce que, si l'on suppose cet enroulement parcouru par un courant, tous les pôles formés au milieu des bobines sont des pôles de même nom, et que par suite, entre les bobines, il se forme de véritables pôles conséquents.

L'enroulement à pôles conséquents est souvent employé pour les alternateurs polyphasés.

Alternateurs diphasés. — Deux sortes d'enroulement, suivant que l'on veut faire l'induit avec ou sans coupure :

Avec coupure (fig. 79). — Il est facile, comme on le voit, de couper

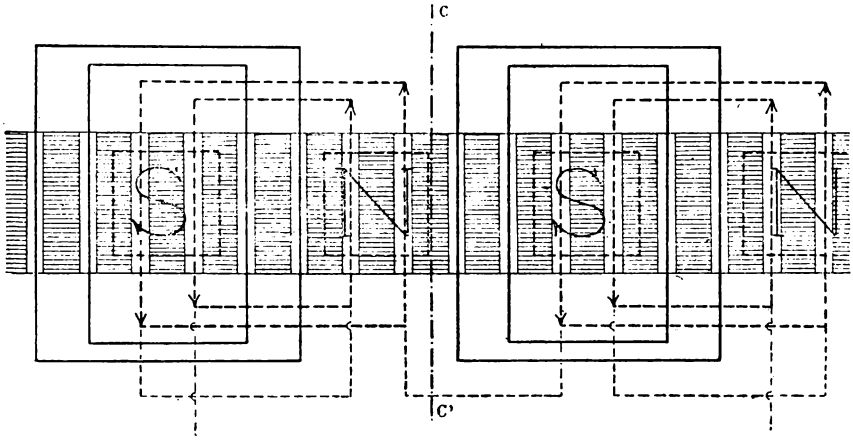


Fig. 79. — Enroulement II. — Enroulement diphasé avec bobines longues et à coupure (4 encoches par pôle).

l'induit en *cc'* par exemple, sans toucher aux bobines et en défaisant seulement deux connexions.

On remarquera que dans l'exemple considéré (fig. 79, quatre encoches par pôle), il faut quatre formes différentes de bobines.

Sans coupure (fig. 80, enroulement III).

Il n'est pas possible, dans ce cas, de couper l'induit sans couper une bobine, mais les formes de bobines sont moins nombreuses et moins grandes, d'où diminution de la résistance et de l'encombrement de l'induit. Aussi cet enroulement est-il beaucoup plus employé que le premier, même lorsqu'on veut faire des induits en plusieurs pièces; il ne faut, dans ce cas, mettre en place les bobines correspondant aux coupures que lorsque l'induit est monté complètement.

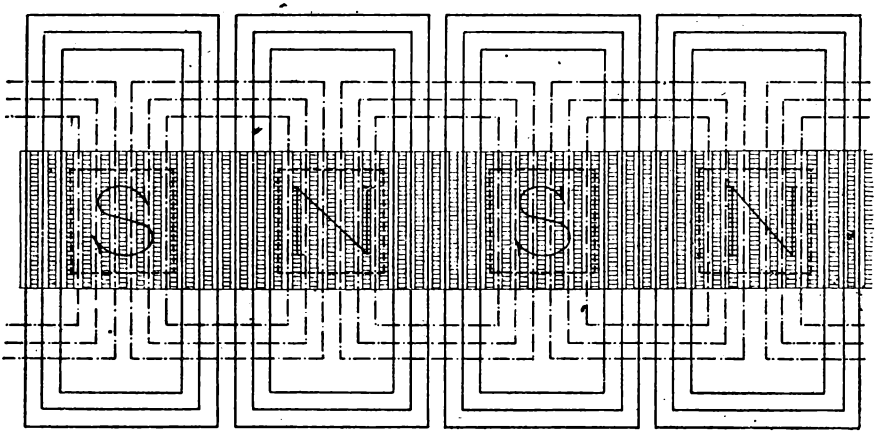


Fig. 80. — Enroulement III. — Alternateur diphasé, avec bobines longues, sans coupure, 12 encoches par pôle. Les connexions entre bobines ne sont pas représentées.

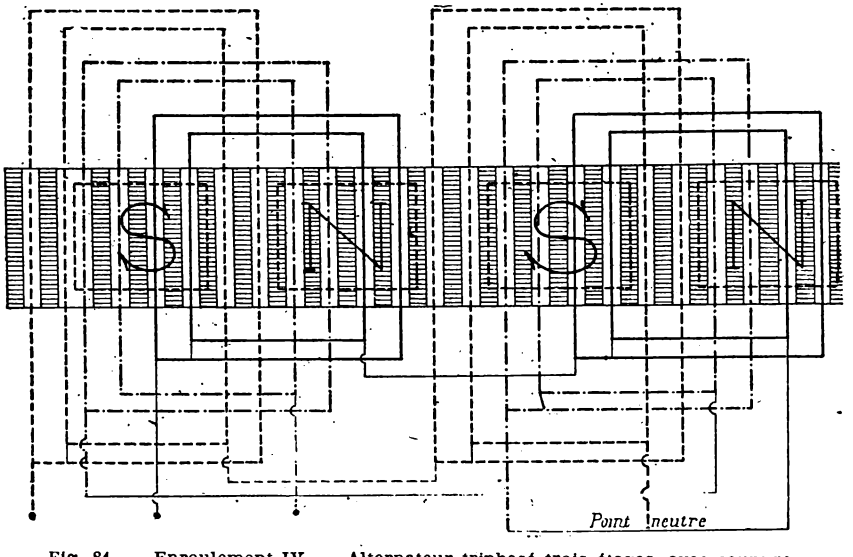


Fig. 81. — Enroulement IV. — Alternateur triphasé trois étages, avec coupure.

Alternateurs triphasés. — Les enroulements triphasés à bobines peuvent se classer ainsi, suivant le nombre d'étages de bobines existant en dehors des tôles :

Enroulement à trois étages de bobines	avec coupures : schéma IV, figure 65.
	sans coupure : schéma V, figure 66.
Enroulements à deux étages de bobines	toujours sans coupure : schéma VI, figure 83.

Dans les enroulements à trois étages de bobines, les trois phases sont bien distinctes, bien séparées les unes des autres, ce qui permet de les reconnaître facilement et rend moins possibles les erreurs de

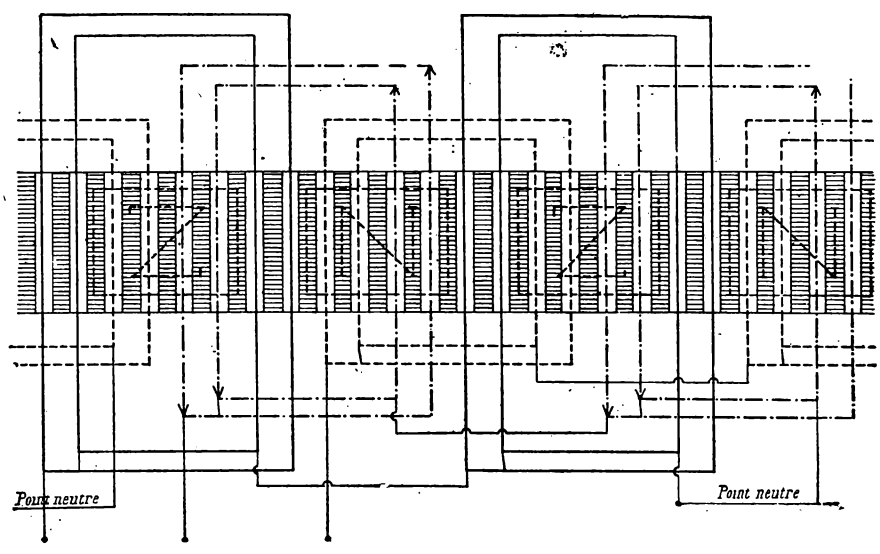


Fig. 82. — Enroulement V. — Alternateur triphasé, trois étages, sans coupure (1).

connexion entre les bobines, mais, en pratique, ce n'est pas un avantage bien réel.

Ces enroulements ont, par contre, les inconvénients signalés pour

(1) Nous avons employé la lettre Z pour désigner les pôles sud afin de rappeler une règle mnémonique donnée par Thomson d'après laquelle les barres transversales des lettres N et Z représentent en quelque sorte la résultante de deux vecteurs, l'un dirigé dans le sens de la force électromotrice induite, l'autre dans le sens du déplacement des conducteurs par rapport à l'inducteur.

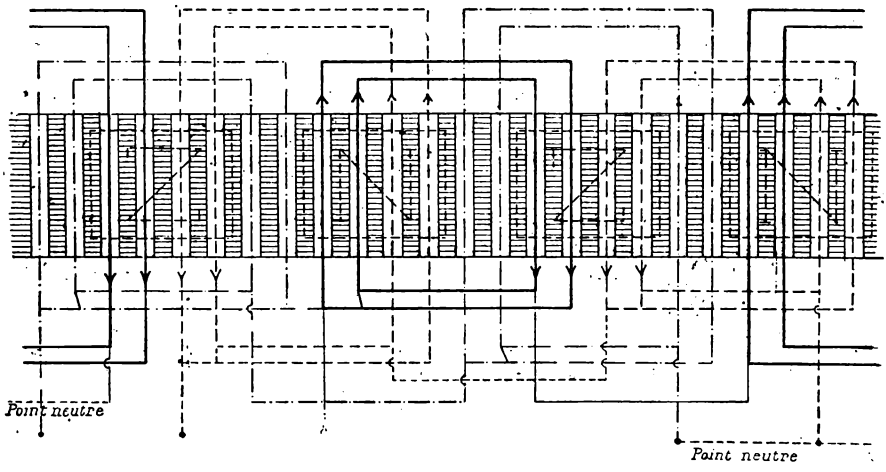


Fig. 83. — Enroulement VI. — Alternateur triphasé, deux étages.
Nombre pair de paires de pôles.

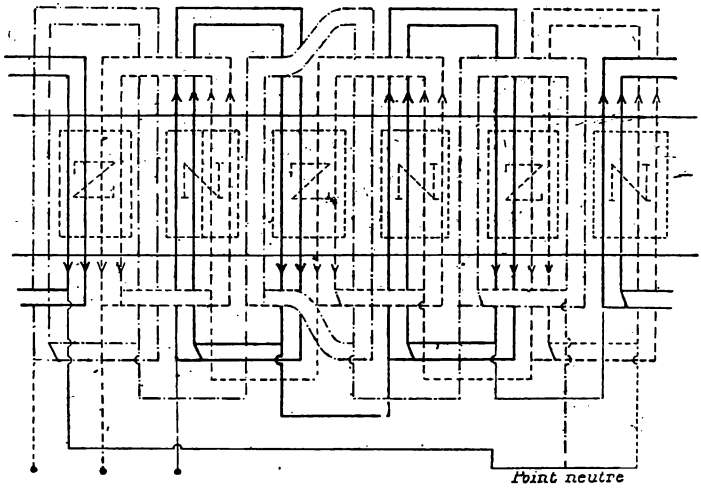


Fig. 84. — Enroulement VII. — Alternateur triphasé, deux étages.
Nombre impair de paires de pôles (bobine mixte).

les enroulements monophasés à pôles conséquents; aussi sont-ils de moins en moins employés.

L'enroulement avec coupure est cependant encore quelquefois utilisé, à cause de l'avantage qu'il présente de permettre la fragmentation de l'induit en plusieurs pièces sans obliger à enlever aucune bobine.

Les enroulements à deux étages de bobines sont de beaucoup actuellement les plus employés, même lorsqu'on doit faire l'induit en plusieurs pièces pour le transport, car on n'exécute alors que sur place, l'alternateur étant monté, les bobines correspondant aux points de coupure.

L'enroulement triphasé à deux étages de bobines est analogue à un enroulement diphasé et pourrait d'ailleurs être transformé en enroulement diphasé mais à condition de changer le nombre de pôles.

Si 2 p est le nombre de pôles, lorsque p est impair, on a, avec les enroulements à deux étages de bobines, une bobine mixte, c'est-à-dire appartenant à la fois aux deux étages. (Enroulement VII, fig. 84.)

2° Enroulements avec bobines enchevêtrées

Les bobines enchevêtrées sont avantageuses, parce que :

1° Il n'y a qu'un seul type de bobine;

2° La longueur de la spire moyenne est, toutes choses égales, plus petite, d'où diminution du poids du cuivre et de la résistance de l'induit.

Par contre, on peut leur reprocher :

1° Une plus grande difficulté dans l'exécution des connexions entre bobines, inconvénient peu grave;

2° Le remplacement un peu plus difficile des bobines;

3° L'impossibilité de les employer avec des tensions un peu élevées, car on rencontrerait de trop grandes difficultés pour isoler entre elles les bobines qui sont enchevêtrées les unes dans les autres.

Ces enroulements sont surtout employés pour les stators des moteurs asynchrones, car ils conviennent très bien dans le cas de tensions et d'intensités moyennes.

On peut les diviser en deux catégories :

1° *Enroulements avec une seule bobine par encoche.* — Le schéma VIII de la figure 86 indique la disposition des phases dans

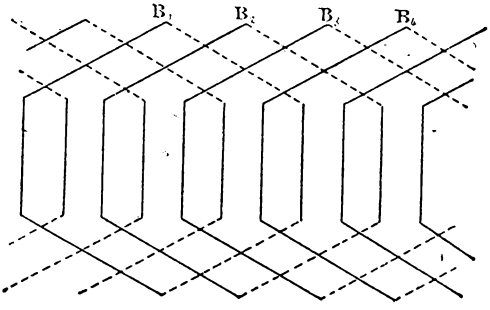


Fig. 85. — Enroulement à bobines enchevêtrées de moteurs asynchrones.

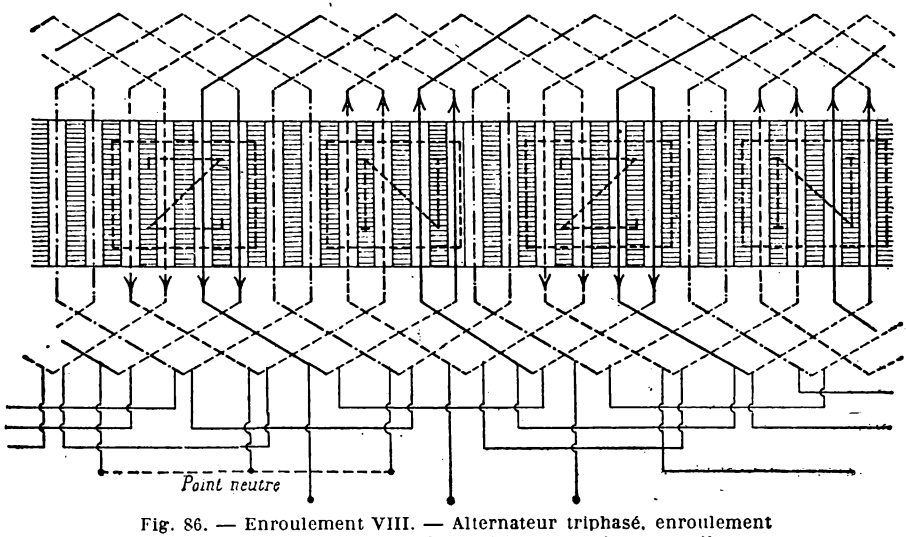


Fig. 86. — Enroulement VIII. — Alternateur triphasé, enroulement imbriqué avec bobines enchevêtrées, 6 encoches par pôles.

cet enroulement, mais on se rend compte beaucoup mieux de la forme qu'il affecte en examinant le schéma de la figure 85 dans lequel on a représenté, en pointillé, les parties des bobines placées en dessous des autres.

On remarquera que pour enlever une bobine B_1, par exemple, il faut soulever plusieurs bobines B_2, B_3, B_4 (fig. 85).

2° *Enroulements avec deux bobines par encoche* (schéma IX, fig. 87). — Le nombre de bobines est évidemment dans ce cas deux

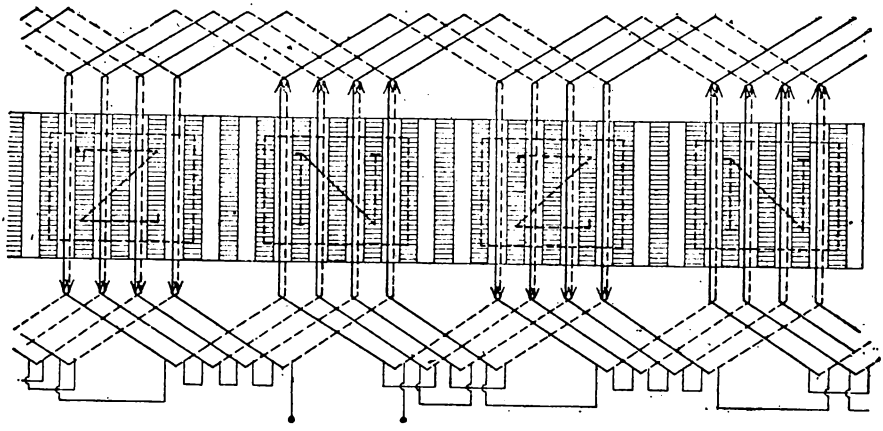


Fig. 87. — Enroulement IX. — Monophasé imbriqué avec bobines.

fois plus grand. Pour enlever une bobine, il faut, comme dans l'enroulement précédent, en retirer plusieurs autres.

3° Enroulements avec barres

Les enroulements formés par des barres de cuivre peuvent se diviser en deux catégories :

1° Les enroulements imbriqués;

2° Les enroulements ondulés.

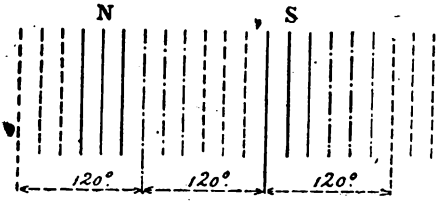


Fig. 88. — Enroulement à phases séparées.

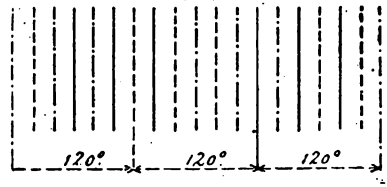


Fig. 89. — Enroulement à phases enchevêtrées.

On peut aussi, à un autre point de vue, diviser ces enroulements, dans le cas d'un alternateur polyphasé, en :

A) *Enroulements à phases séparées*, dans lesquels, pour chaque

pôle, tous les conducteurs d'une même phase sont à côté les uns des autres sans être mélangés aux conducteurs des autres phases (fig. 88).

B) *Enroulements à phases enchevêtrées,* dans lesquels les phases sont mélangées entre elles (fig. 89).

Ces derniers ont l'avantage de donner une force électromotrice un

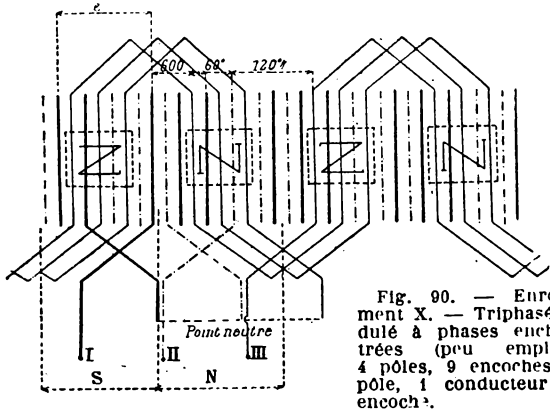


Fig. 90. — Enroulement X. — Triphasé ondulé à phases enchevêtrées (peu employé), 4 pôles, 9 encoches par pôle, 1 conducteur par encoche.

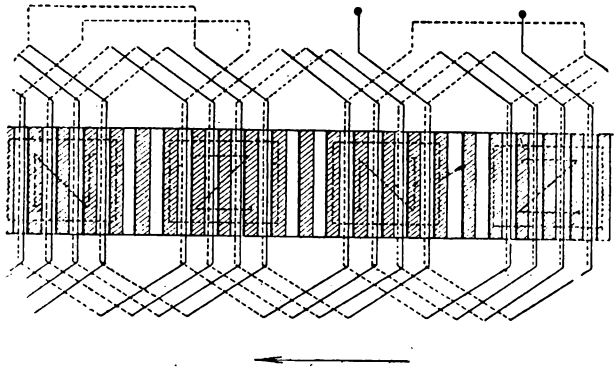


Fig. 91. — Enroulement XI. — Monophasé imbriqué, 2 barres par encoche.

peu plus sinusoïdale, mais ils sont plus compliqués. Aussi sont-ils très peu employés, sauf parfois pour les rotors de moteurs asynchrones.

On n'envisagera ici que les enroulements à phases séparées.

Les enroulements à phases enchevêtrées peuvent se faire également avec des bobines.

La figure 90 donne un exemple d'enroulement à phases enchevêtrées :

1° **Enroulements imbriqués** (1), dans lesquels, lorsqu'on suit l'enroulement, on revient en arrière de façon à former des boucles.

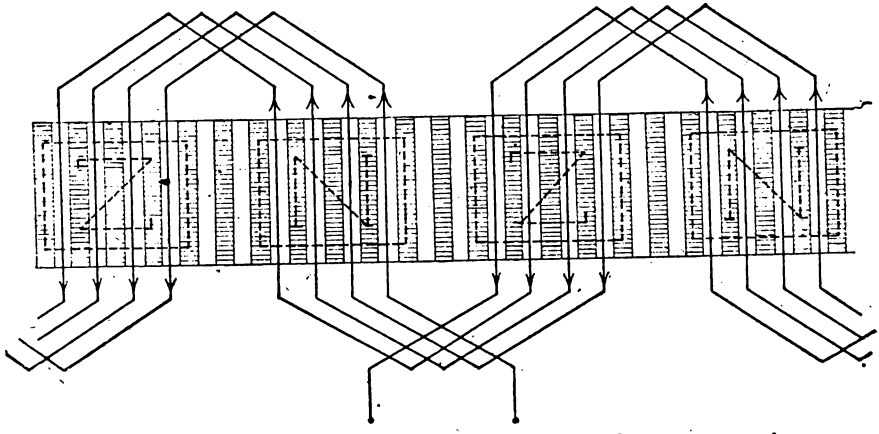


Fig. 92. — Enroulement XII. — Monophasé ondulé, 1 barre par encoche.

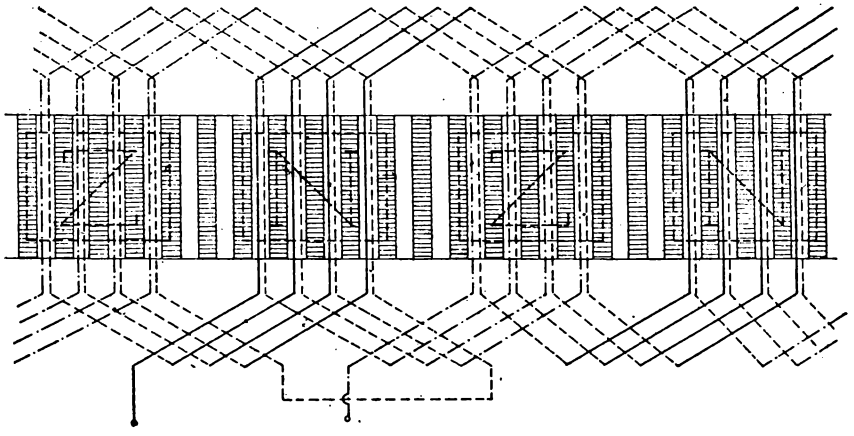


Fig. 93. — Enroulement XIII. — Monophasé ondulé, 2 barres par encoche, 6 encoches par pôle.

On obtient autant d'enroulements distincts que de paires de pôles (fig. 91).

On peut coupler ces enroulements, soit en parallèle, soit en série.

(1) *Ou bouclés.*

L'enroulement imbriqué avec barres est peu employé;

2° **Enroulements ondulés,** dans lesquels on va toujours en avant en faisant des ondulations (voir schémas XII, XIII et XIV, fig. 92, 93 et 94).

On a vu que dans les enroulements imbriqués, il y avait en quelque sorte autant d'enroulements distincts (par phase) que de pôles.

Dans les enroulements ondulés, le nombre des enroulements distincts est égal au nombre de barres par encoche. Il est donc beaucoup plus faible en général.

Il s'ensuit que les connexions pour relier ces enroulements entre

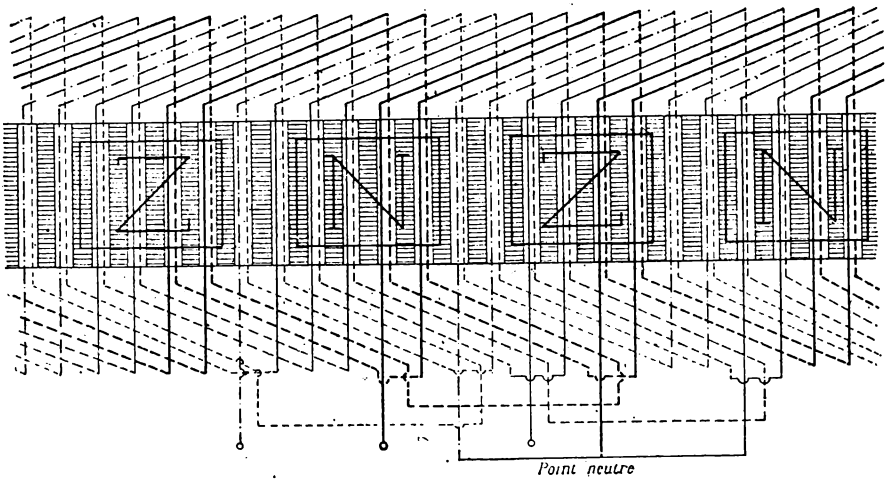


Fig. 94. — Enroulement XIV. — Triphasé ondulé, 2 barres par encoche, 6 encoches par pôle.

eux sont bien moins nombreuses et beaucoup plus faciles à faire avec les enroulements ondulés.

C'est là un avantage assez important, qui justifie l'emploi exclusif des enroulements ondulés.

Ces enroulements ont, par contre, l'inconvénient que n'ont pas les enroulements imbriqués, de ranger à côté les uns des autres des conducteurs ayant une différence de potentiel relativement grande.

Cet inconvénient a peu d'importance en général, car ces enroulements ne doivent jamais supporter que des tensions assez faibles.

Couplage en série ou en parallèle des enroulements

On montera en série toutes les bobines ou toutes les barres dans un enroulement monophasé — ou dans chaque phase d'un enroulement polyphasé — chaque fois que cela est possible, c'est-à-dire lorsque l'intensité devant être débitée par l'alternateur n'est pas trop forte.

Dans le cas où l'intensité est un peu grande, on est obligé d'employer pour chaque phase plusieurs circuits groupés en parallèle.

Le groupement de plusieurs circuits en parallèle doit être fait avec soin, car il faut *que dans tous les circuits la force électromotrice induite soit la même à chaque instant* pour éviter des courants de circulation, qui auraient pour principal effet de faire chauffer l'induit et de diminuer le rendement de l'alternateur.

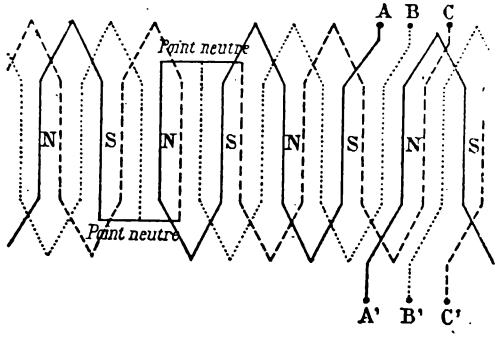


Fig. 95. — Groupement de circuits induits en parallèle.
Deux circuits en parallèle par phase.

Pour grouper plusieurs circuits en parallèle, on peut, dans le cas de bobines, enrouler à la fois plusieurs conducteurs pour former chaque bobine et relier ensuite tous ces conducteurs en parallèle — dans le cas de barres, mettre plusieurs barres par encoches de façon à former plusieurs enroulements imbriqués ou ondulés (voir schémas XIII, XIV), que l'on couple ensuite en parallèle.

On peut également adopter une disposition analogue à l'une ou à l'autre de celles indiquées par les figures 95 et 96.

Dans la figure 79, chacun de ces enroulements occupe seul une

moitié de l'induit. En réunissant ensemble respectivement les bornes AA', BB', CC', on met les enroulements en parallèle.

Dans la figure 96 (enroulement triphasé à trois étages et avec coupure) il y a autant d'enroulements en parallèle qu'il y a de paires de pôles. On a ainsi en quelque sorte une série d'alternateurs bipolaires montés en parallèle.

On peut évidemment, au lieu de diviser l'alternateur par paires de pôles, former une série d'alternateurs élémentaires à 4, 6, 8 pôles et monter tous ces alternateurs en parallèle.

Lorsque l'on met en parallèle des enroulements correspondant à différentes parties de l'induit, il faut veiller tout particulièrement à éviter des dissymétries dans l'entrefer capables de créer des dissymétries dans les forces électromotrices en parallèle et par suite des courants de circulation. S'il n'y a que deux enroulements en parallèle, comme une dissymétrie dans l'entrefer se produit ordinaire-

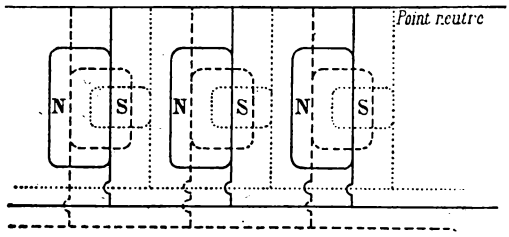


Fig. 96. — Groupement de circuits induits en parallèle.
Autant de circuits en parallèle par phase que de paires de pôles.

ment par suite de l'usure des coussinets, il faudra disposer les deux enroulements de préférence de chaque côté d'un plan vertical passant par l'arbre plutôt qu'en dessus et en dessous d'un plan horizontal.

Montage en étoile ou en triangle des alternateurs triphasés

Dans le cas où les circuits sont équilibrés (force motrice, éclairage ordinaire), le montage en étoile doit, autant que possible, toujours être employé de préférence, parce que :

1° Pour une même tension U, à fournir aux bornes de l'alterna-

teur, il faut, avec le montage en triangle, que chaque enroulement donne toute cette tension U, tandis que, dans le montage en étoile, chaque enroulement ne doit fournir que $\frac{U}{\sqrt{3}}$

Il faut donc, dans ce dernier cas, ou mettre moins de spires, ce qui simplifie la construction, ou adopter une force électromotrice induite plus faible par spire, ce qui facilite l'isolement entre spires.

Il est bien entendu que le poids de cuivre est le même dans les deux cas, car si, avec le montage en étoile, la force électromotrice à produire est par enroulement $\sqrt{3}$ fois plus petite, par contre l'intensité débitée par chaque enroulement est $\sqrt{3}$ fois plus grande;

2° Avec le montage en étoile, on n'a pas à craindre les courants de circulation qui peuvent se produire dans les montages en triangle, par suite surtout de légères dissymétries dans les enroulements;

3° Les connexions sont en général un peu plus simples, avec le montage en étoile;

4° Il est quelquefois avantageux d'avoir un point neutre (1).

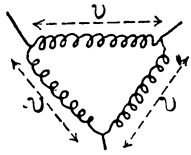


Fig. 97. — Montage en triangle.

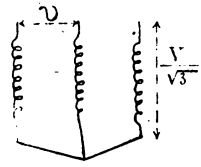


Fig. 98. — Montage en étoile.

Le montage en triangle est avantageux lorsque l'on veut pouvoir, dans la suite, élever la tension en employant seulement le montage en étoile ou bien surtout lorsque les alternateurs doivent alimenter des circuits très déséquilibrés (électrochimie, éclairage dans des cas spéciaux). Lorsque les phases sont déséquilibrées, on a, en effet, beaucoup moins à craindre les dissymétries de tension sur les trois phases avec le montage en triangle qu'avec le montage en étoile.

(1) Par exemple lorsque l'on veut avoir une distribution avec fil neutre.

BOBINAGE DE L'INDUIT

D'une manière générale, on entend par bobinage la mise en place des conducteurs sur la machine, les conducteurs pouvant former des bobines ou être constituées par des barres.

Dans les ateliers de bobinage, on cherche surtout à réduire le plus possible les frais de main-d'œuvre, qui sont relativement très importants, et à augmenter la rapidité de fabrication.

A cet effet, depuis quelques années, en France comme à l'étranger, on tend de plus en plus à n'employer que des femmes et des enfants pour le bobinage, ce travail ne demandant en général que du soin et de l'adresse.

D'autre part, on cherche de plus en plus, à l'heure actuelle, à faire le bobinage mécaniquement et sur gabarit, c'est-à-dire à enrouler d'avance les conducteurs sur un moule au moyen d'un tour, de façon à n'avoir à placer sur la machine que des bobines toutes faites, au lieu d'enrouler les conducteurs directement sur la machine, opération qui demande un temps toujours beaucoup plus considérable.

Pour les induits d'alternateurs, les bobines faites à l'avance ne peuvent être utilisées qu'avec les encoches complètement ouvertes; aussi ces encoches sont-elles à peu près exclusivement employées en Amérique, où la main-d'œuvre est relativement très chère.

Avec les encoches à demi fermées, on peut également employer des bobines faites sur gabarit. Les conducteurs, qui ne sont liés ensemble qu'aux extrémités des bobines, sont alors introduits un par un à travers la fente dans l'encoche garnie au préalable d'un isolant. Un bon isolement étant difficile à obtenir dans ce cas, on n'adopte cette solution que pour les induits à basse tension.

Avec les encoches complètement fermées et avec celles qui sont à demi fermées, dans le cas d'une tension un peu élevée, on doit enrouler les conducteurs à la main sur la machine même. On emploie aussi dans ce cas des gabarits, ordinairement en bois, que l'on fixe sur l'induit et qui servent à donner une forme convenable et bien régulière aux têtes de bobines, c'est-à-dire aux conducteurs qui se trouvent en dehors des tôles de l'induit.

Pour former le bobinage, on emploie du fil, du câble, du ruban ou des barres.

Le fil et le câble, utilisés surtout pour les faibles intensités, peuvent être ronds ou méplats, ils sont isolés par une ou deux couches de coton.

Il faut veiller tout particulièrement, lorsqu'on emploie du fil et du câble, à ce que la différence de tension entre deux conducteurs voisins ne soit pas trop considérable. On placera donc les conducteurs dans les encoches d'une façon convenable en adoptant, par

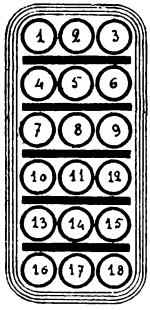


Fig. 99. — Bonne disposition des conducteurs dans une encoche.

Entre les conducteurs 1 et 4, par exemple, la différence de tension correspond à la somme des forces électromotrices de trois spires.

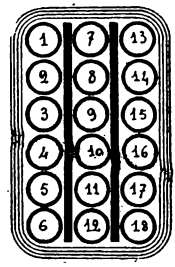


Fig. 100. Mauvaise disposition des conducteurs.

Entre les conducteurs 1 et 7, la différence de tension correspond à la somme des forces électromotrices de six spires.

exemple, la disposition des conducteurs suivant la figure 99 de préférence à celle de la figure 100. C'est surtout dans les turbo-alternateurs que l'on a à redouter une forte différence de tension entre les conducteurs car, tout d'abord par unité de longueur de conducteur, la force électromotrice induite est plus grande puisque la vitesse de déplacement du flux est sensiblement plus considérable et ensuite, étant donnée la très grande largeur de l'induit, les spires sont beaucoup plus longues. Ainsi, pour les alternateurs de moyenne puissance tournant à une vitesse inférieure à 750 tours, la force électromotrice induite par centimètre de longueur de conducteur varie ordinairement de 0,12 à 0,2 volt, et la force électromotrice induite par spire de 10 à 25 volts, tandis que pour les turbo-alternateurs la force électromotrice par centimètre de lon-

gueur peut dépasser 0,5 volt et la tension par spire 100 volts, pour les turbo-alternateurs de grande puissance.

Le fil et le câble présentent surtout l'inconvénient d'utiliser assez mal la place possible dans les encoches et de laisser de l'air entre les conducteurs, ce qui est nuisible, comme on le verra plus loin.

Le ruban de cuivre est disposé à plat dans les encoches, comme le montre la figure 101.

On donne d'abord au ruban de cuivre nu la forme définitive qu'il doit avoir pour constituer la bobine en l'enroulant sur un gabarit. Pour isoler ensuite le ruban, on écarte les spires et on entoure le conducteur avec un ruban de coton ou en papier, ou bien on dispose entre les spires une bande de pressphann.

La bobine est ensuite placée dans les encoches qui, bien entendu, doivent être complètement ouvertes.

L'emploi du ruban de cuivre présente les avantages suivants sur celui du fil ou du câble :

a) Meilleur coefficient d'utilisation de l'espace disponible dans les encoches.

b) Ensemble très rigide.

c) Entre deux conducteurs voisins il n'existe que la tension d'une seule spire.

d) Le ruban de cuivre étant courbé d'avance avant son isolation,

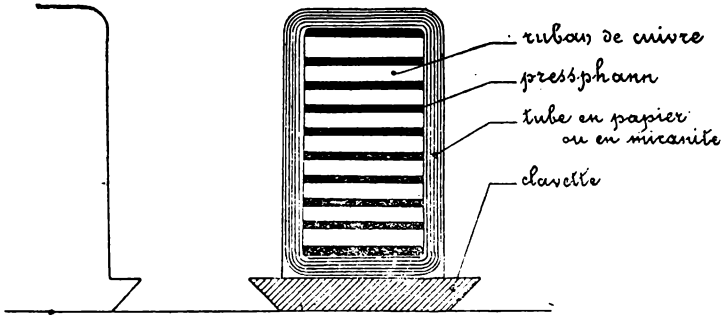


Fig. 101. — Coupe d'une bobine à ruban de cuivre.

on évite les avaries qui pourraient se produire à l'isolement en formant la bobine.

Le ruban de cuivre ne peut être employé que si l'intensité est suffisamment forte.

Dans les grandes encoches complètement ouvertes, pour les turbo-alternateurs surtout, il peut se produire des courants de Foucault dans le ruban de cuivre placé *à l'extrémité des encoches*, près de l'entrefer. Aussi, souvent, emploie-t-on alors du câble méplat que l'on ajoute au ruban pour former les premières, et même les secondes spires placées sous les clavettes.

Isolation des conducteurs par rapport à la masse. — Dans les encoches, l'isolation des conducteurs, par rapport à la masse, est effectuée au moyen de tubes (ou caniveaux) qui sont ordinairement en carton jusqu'à 500 volts environ et en micanite au-dessus. Ces tubes sont essayés séparément à une tension alternative égale au triple de la tension normale de fonctionnement de l'alternateur. Quelquefois, dans le cas des bobines faites sur gabarit, le tube de micanite est constitué sur le faisceau de conducteurs avant son introduction dans l'encoche. Pour cela, on enroule autour du faisceau une feuille de micanite gommelaquée. On soumet ensuite la barre ainsi obtenue à l'action d'un fer chaud qui tourne dans le sens d'enroulement de la micanite en appuyant fortement. On obtient de cette façon un isolant très compact formant corps avec le faisceau.

En dehors des encoches, les conducteurs sont isolés surtout par l'air; il faut donc bien séparer entre eux les conducteurs appartenant à des phases différentes et les éloigner le plus possible de la masse.

On peut compter 1 centimètre environ par 1.000 volts comme écartement nécessaire pour obtenir une sécurité suffisante.

Bobinage des induits à haute tension. — Vers 1900, on ne dépassait guère 10.000 volts (tension composée dans le cas du triphasé) comme tension produite directement par les alternateurs (alternateurs triphasés du transport Paderno-Milan à 13.500 volts). Depuis, on a construit des alternateurs pour des tensions beaucoup plus élevées, comme par exemple ceux de l'usine d'Avignonet de la Société Générale de Force et Lumière, qui ont été établis par MM. Schneider et C^{ie} pour produire directement 26.000 volts composés. Ces alternateurs, il est vrai, après quelque temps de fonctionnement à 26.000 volts, ont dû être montés en triangle pour ne

donner que 15.000 volts, puis être rebobinés pour fournir 15.000 volts en étoile.

L'expérience paraît avoir montré, en effet, qu'on n'a pas intérêt à faire produire directement par les alternateurs des tensions très élevées.

Pour le moment, la tension limite que les constructeurs paraissent ne pas vouloir dépasser est de 15.000 volts environ. Lorsque l'on veut alimenter un réseau à tension élevée, il est préférable de prendre des transformateurs élévateurs. La Maison Ganz de Budapest avait cependant exposé à l'Exposition de Turin un alternateur triphasé pouvant donner directement 30.000 volts composés.

Les principales causes qui rendent les alternateurs à haute tension peu pratiques sont les suivantes :

1° *Les difficultés d'isolement,* qui sont relativement moins grandes pour un transformateur.

Dans un transformateur, en effet, les bobines à haute tension n'ont à être isolées par rapport à la masse (ou par rapport à l'enroulement basse tension) que sur une seule face (fig. 102), celle qui est en regard du cylindre isolant, tandis que dans les alternateurs, toutes les faces de la bobine doivent être isolées de la masse (fig. 103).

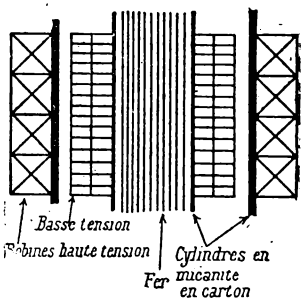


Fig. 102. — Facilité de réalisation d'un haut isolement dans un transformateur.

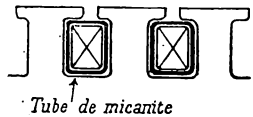


Fig. 103 — Difficulté de réalisation d'un haut isolement dans un alternateur.

En un mot, les surfaces à isoler sont beaucoup plus réduites dans les transformateurs.

De plus, dans les transformateurs, la place disponible pour les isolants est beaucoup plus grande que dans les alternateurs;

2° *Le prix plus élevé et le rendement plus faible de l'alternateur.* — Dans les alternateurs à très haute tension, les isolants prennent une très grande place dans les encoches, au détriment du cuivre.

Pour le même inducteur, le même circuit magnétique, la même carcasse, on aura, avec un enroulement haute tension, une puissance qui pourra être inférieure de plus de 10 à 20 % à celle fournie par un enroulement à basse tension ou à moyenne tension. Il s'en suit évidemment un rendement plus faible et un prix plus élevé;

3° *Production d'ozone en assez grande quantité,* lorsqu'on dépasse une tension de 20 à 25.000 volts. La production d'ozone est beaucoup plus grande que dans un transformateur, sans doute parce que, dans un transformateur, les conducteurs sont moins rapprochés de la masse, les surfaces des bobines exposées à l'air ou voisines de la masse sont beaucoup plus faibles. La production de l'ozone dépend non seulement de la tension de l'alternateur, mais encore de la différence de tension entre les conducteurs placés dans les encoches.

L'ozone, non seulement constitue une gêne physiologique très sensible pour le personnel chargé de la surveillance dans le cas des alternateurs à très haute tension, comme ceux qui fonctionnaient à l'usine d'Avignonet, mais a encore l'inconvénient de détériorer les isolants petit à petit. L'air est, en effet, décomposé et donne, avec l'humidité, de l'acide hypoazotique et même un peu d'acide azotique. Ces acides rongent rapidement les isolants et même attaquent le cuivre des conducteurs pour former des sels produisant des courts-circuits. La décomposition de l'air est surtout à craindre à l'intérieur des encoches où l'air est difficilement renouvelé, aussi les constructeurs ont-ils cherché pour les alternateurs à moyenne et à haute tensions à supprimer complètement l'air dans les encoches, en remplissant les vides entre les conducteurs avec une matière spéciale pour chaque constructeur, isolante, non oxydante, non acide, exempte d'humidité, restant solide pour une température inférieure à 100° mais fondant à moins de 150°, pénétrant bien entre les conducteurs, séchant et durcissant à l'abri de l'air et aussi bonne conductrice de la chaleur que possible.

L'ozone est à craindre, non seulement dans les machines à très haute tension, mais même aussi pour les alternateurs à moyenne tension de 3.000 à 10.000 volts.

Bobinage des induits à basse tension. — Dans le cas de la basse tension, on emploie des barres, et les enroulements sont groupés en parallèle, ainsi qu'on l'a dit.

Avec les encoches complètement ouvertes, les barres sont toutes tordues d'avance sur un gabarit, de façon qu'on n'ait qu'à les placer dans les encoches, pour que les extrémités des barres, devant être reliées ensemble, viennent d'elles-mêmes en contact. Une fois toutes les barres placées, on soude ensemble les extrémités qui doivent être réunies.

Avec les encoches complètement fermées ou à demi fermées, on doit *enfiler* les barres dans les encoches. On ne peut donc tordre auparavant celles-ci qu'à un bout.

Dans ce cas, après avoir enfilé les barres, ou bien on les retord une seconde fois sur l'induit même (fig. 104) de façon à amener en contact les extrémités devant être réunies, ou bien on tord convenablement (sur gabarit) les barres d'un seul côté, de façon à n'avoir pas à les tordre une seconde fois pour les amener en contact (fig. 105).

On voit que, pour faire l'enroulement de la figure 105, il suffit d'enfiler dans les encoches par la face A toutes barres tordues ainsi | et par la face B celles tordues en sens inverse |.

Le mode de bobinage indiqué (fig. 105), qui est assez employé

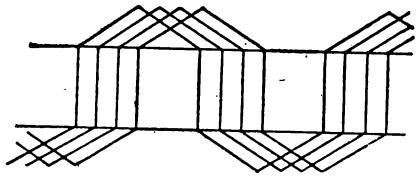


Fig. 104. — Encoches fermées ou mi-fermées. Torsion des barres à un bout après enfilage.

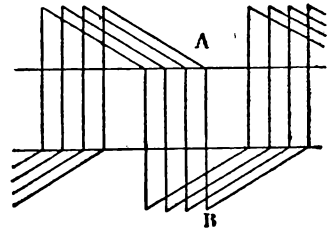


Fig. 105. — Encoches fermées ou mi-fermées. Emploi de barres tordues d'un seul côté sur gabarit.

dans le cas de grosses barres, car il réduit considérablement la main-d'œuvre, a l'inconvénient de nécessiter un peu plus de cuivre et d'augmenter légèrement la résistance de l'induit, parce que la

longueur ACB, pour aller d'une encoche à l'autre, est évidemment plus grande que la longueur correspondante AC'B (fig. 106).

Les barres doivent être maintenues solidement dans les encoches,

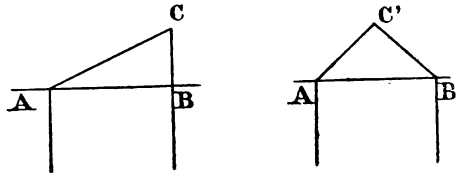


Fig. 106. — Augmentation du poids de cuivre par l'emploi de barres à torsion préalable d'un côté sur gabarit.

car surtout au moment d'un court-circuit, elles sont soumises à des forces importantes pouvant les faire vibrer et déterminer l'usure rapide des isolants.

On a construit pour l'électrométallurgie des alternateurs à basse tension de 1.000 kilovolts-ampères, mais nous ne croyons pas que l'on ait dépassé beaucoup cette puissance, la construction devenant en effet trop difficile; les barres qui ont une section trop grande peuvent être le siège de courants de Foucault intenses et doivent supporter des forces électromagnétiques capables de produire de très fortes vibrations.

Aussi est-il préférable, même à partir de 500 kilovolt-ampères, d'employer des alternateurs à moyenne tension (2.000 à 5.000 volts) et des transformateurs abaisseurs. Les transformateurs présentent d'ailleurs l'avantage souvent important de permettre, par des couplages de spires, le changement facile de la tension.

MÉTAUX EMPLOYÉS POUR LA CONSTRUCTION ÉLECTROMÉCANIQUE

I. Cuivre

C'est le seul métal employé comme conducteur. Comme les moindres traces d'impuretés diminuent considérablement sa conductibilité (2 % d'impuretés à peine réduisent la conductibilité à plus de moitié) on emploie toujours du cuivre pur électrolytique.

Résistivité du cuivre pur $\rho = 1.561$ microhms-centimètres par centimètre carré à 0°/.

Résistivité du cuivre en pratique $\rho = 1{,}6$ à $1{,}8$ vers 15°.

Lorsqu'on veut tenir compte de l'échauffement de la machine (40 à 50°) on prend souvent $\rho = 2$.

Suivant les cas, le cuivre est *recuit* (ce qui le rend sinon souple, du moins malléable) ou *écroui* par des laminages à froid (ce qui lui donne de la raideur et de l'élasticité).

Pour les bobinages, le cuivre doit être *recuit,* afin d'être souple. Pour les connexions d'un tableau de distribution, il doit être *écroui* afin que ces connexions restent bien rigides. On emploie ou du cuivre massif ou du câble. Dans les deux cas, le conducteur peut être rond, carré ou rectangulaire. Le câble a l'avantage d'être plus souple, ce qui facilite souvent le bobinage, et de réduire beaucoup les pertes par courants de Foucault qui se produisent dans les gros conducteurs, surtout lorsque ces conducteurs ne se trouvent pas noyés dans du fer.

Dimensions maxima des conducteurs massifs. — Conducteurs ronds : 4 à 5 $^{m}/_{m}$ de diamètre.

Conducteurs plats = 3 à 4 $^{m}/_{m}$ d'épaisseur.

Au-dessus de ces dimensions, les conducteurs sont trop difficiles à manipuler et l'on a à craindre des courants de Foucault trop considérables. On subdivise les conducteurs en plusieurs autres.

Avantages des conducteurs carrés ou rectangulaires

Ces conducteurs sont très employés actuellement, principalement parce que :

1° Ils laissent entre eux moins de vide, donc donnent lieu à moins de place perdue que les conducteurs ronds. Ainsi dans les encoches, on obtient avec eux un coefficient d'utilisation pouvant aller jusqu'à 85 %, tandis qu'avec les fils on n'obtient que 50 à 60 %, de la place disponible;

2° Dans les bobines tournantes, les conducteurs ronds ont plus de tendance que ceux carrés ou rectangulaires, à se déplacer et jouer entre eux sous l'influence de la force centrifuge et de la dila-

tation due à l'échauffement, ce qui peut à la longue user les isolants et amener des courts-circuits.

Câbles. — Un câble est composé de fils appelés brins se rangeant géométriquement les uns à côté des autres par rangées autour d'un fil central appelé âme (fig. 107). De tels câbles sont dits à un seul toron. Les câbles à plusieurs torons sont ceux qui sont composés de plusieurs câbles à un seul toron, jouant chacun le rôle de brin. Les câbles en grelins sont composés de plusieurs câbles à plusieurs torons, ces câbles jouant alors le rôle de brins. Dans la construction des machines on n'emploie guère que des câbles à un seul toron; les autres sont utilisés pour les lignes nécessitant de grosses sections.

Fig. 107. — Câble à 7 brins.

Pour les câbles à un seul toron, on trouve facilement la justification du tableau suivant (d étant le diamètre d'un brin) :

Nombre de brins	7	19	31	61	91
Diamètre du câble nu	$3d$	$5d$	$7d$	$9d$	$11d$

Isolation des conducteurs

Ils sont guippés en général avec une, deux ou trois couches de coton.

Il n'est pas très prudent de n'employer qu'une seule couche; avec deux couches, on peut admettre jusqu'à 50 ou 100 volts entre deux conducteurs voisins, avec trois couches de 100 à 150 volts. On compte en général 1/10 $^{m}/_{m}$ d'épaisseur par couche.

Pour les câbles, le guippage est fait avec une couche de coton plus une tresse.

Epaisseur de ce guippage : 3,5/10 $^{m}/_{m}$ environ.

Alliages usuels du Cuivre

Les constantes mécaniques et électriques des alliages de cuivre varient dans de très grandes proportions, suivant la nature et le pourcentage des métaux ajoutés.

Laiton. — Alliage de cuivre et de zinc. Il existe de nombreuses formules :

Laiton français. — 1er titre :

Cu 66 %
Zn 34 %
Résistivité ρ = 5,5 à 15°.

Employé sous forme de planches laminées ou de tubes étirés sans soudures. Se prête bien à l'emboutissage.

Laiton français. — 2e titre :

Cu 60 %
Zn 40 %
ρ = 8,5 à 15°.

Employé pour les pièces découpées ou décolletées, vis, tiges filetées, lames de balais, etc.

Se prête moins bien à l'emboutissage que le premier, car il est trop sec.

Laiton fondu. — Une des formules les plus employées est la suivante :

Cu 75 %
Zn 22,5 %
Sn 2 %
Impuretés 0,50 %
ρ = 8,5 à 9 vers 15°

Le laiton ou cuivre jaune est plus dur et plus flexible que le cuivre, s'oxyde moins et coûte moins cher.

Il est très ductible, fusible comme le bronze, ce qui permet de le mouler facilement. Il s'écrouit par la compression ou la torsion, mais le recuit lui rend sa malléabilité. Il ne peut pas se travailler à la lime qu'il empâte.

Bronze. — Alliage de cuivre et d'étain auquel on ajoute souvent zinc et nickel (maillechort), phosphore (bronze phosphoreux), silicium (bronze silicieux) ou chrôme (bronze chrômeux).

L'étain augmente la dureté du cuivre, mais lui enlève sa malléabilité et le rend cassant et sonore.

La couleur du bronze se rapproche du blanc, au fur et à mesure que la proportion d'étain augmente.

A l'inverse de l'acier, le bronze porté au rouge, puis trempé, devient mou, malléable et ductile comme le cuivre rouge. Le recuit lui rend sa dureté et son élasticité.

CHAPITRE III

CONSTRUCTION DES ALTERNATEURS MODERNES

(Suite)

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE L'INDUCTEUR

Les inducteurs modernes sont presque toujours composés de noyaux polaires fixés solidement à la jante d'une roue appelée roue

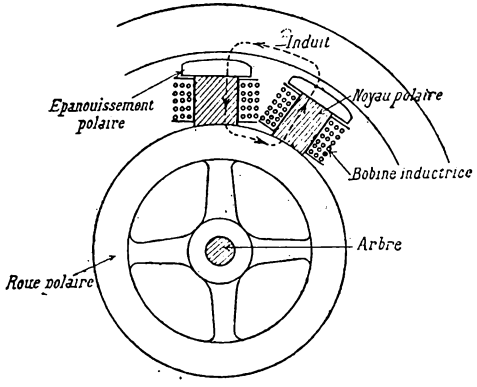


Fig. 108. — Constitution générale de l'inducteur d'un alternateur.

polaire, chacun des noyaux étant recouvert d'une bobine inductrice, comme la représente la figure 108.

Les noyaux polaires sont, en outre, terminés par une partie de section plus grande, appelée épanouissement polaire ou pièce polaire.

Le système inducteur se compose donc des parties suivantes que l'on va étudier successivement :

L'arbre, ses coussinets et ses paliers.

La roue polaire.

Les noyaux polaires et leurs épanouissements.

Les bobines inductrices.

ARBRE

L'arbre est toujours en acier de première qualité. Il est forgé au pilon ou à la presse hydraulique. Il présente une charge de rupture de 60 à 65 kilogrammes par millimètre carré et un allongement de 18 à 20 % avant la rupture.

Il a à résister en temps normal :

1° A la torsion provenant de la combinaison du couple moteur et du couple résistant;

2° A la flexion provenant du poids de l'inducteur et aussi de l'attraction magnétique des pôles pouvant résulter d'une dissymétrie dans l'entrefer.

Dans le cas où l'alternateur est actionné par une poulie commandée par une courroie, il faut tenir compte encore de la réaction de la courroie sur l'arbre.

Souvent, actuellement, on se contente de calculer les arbres des alternateurs simplement à la flexion en admettant une flèche maximum, flèche produite par le poids de l'inducteur et par l'attraction magnétique due à l'usure des coussinets.

On admet pour la valeur de cette flèche 3 à 5 % de l'entrefer.

Influence de l'attraction magnétique. — Chaque pôle inducteur, agissant comme un électro-aimant, est soumis à une force, relativement considérable, émanant de l'induit.

En temps normal, tout étant symétrique, l'ensemble des forces agissant sur les pôles se fait équilibre.

Mais si, pour une cause quelconque — l'usure des coussinets, par

exemple — une dissymétrie vient à se produire dans l'entrefer, ces forces, n'étant plus les mêmes partout, donnent une résultante agissant sur l'arbre.

Pour avoir une idée de l'importance de cette attraction magnétique sur l'arbre, on peut citer l'exemple suivant donné par Kapp.

Exemple de calcul de l'attraction magnétique. — Kapp étudie une machine ayant les données suivantes :

Poids de la partie tournante.....	3,700 kgs
Entrefer normal	10,5 mm
Induction normale dans l'entrefer.....	4.500 gauss
Surface d'un pôle.....	680 cm²
Nombre de pôles.....	20

Si, dit-il, on admet que l'arbre soit descendu de 1 millimètre, on aura :

Pour l'entrefer à la partie supérieure.....	$11^{mm},5$
— — inférieure	$9^{mm},5$

L'induction dans l'entrefer variant sensiblement en raison inverse de sa longueur, sa valeur sur les côtés sera normale, soit 4.500 gauss, tandis qu'elle sera de 4.100 gauss en haut et de 5.000 en bas.

Si l'on applique la formule classique de la force portante, formule que l'on peut employer ici, car l'entrefer est très faible par rapport à l'étendue des surfaces polaires, on aura :

$$F = \frac{\mathcal{B}^2 s}{8\pi} \text{ en dynes, si } s \text{ est exprimé en centimètres carrés.}$$

Par centimètre carré de surface polaire, et en exprimant l'attraction en kilogrammes, on aura :

Pour le haut :

$$f_1 = \frac{F_1}{s} = \frac{4100^2}{8\pi \times 1000 \times 981} = 0^k,68;$$

Pour le bas :

$$f_2 = \frac{F_2}{s} = \frac{\overline{5000}^2}{8\pi \times 1000 \times 981} = 1^k,01.$$

On trouve ainsi que la différence des efforts exercés de ce fait sur les deux pièces polaires, la plus haute et la plus basse, est de 225 kilogrammes d'où, pour la carcasse entière, une force de 1.000 à 1.200 kilogrammes, soit 30 % du poids total de la partie tournante.

Remarques. — Comme on le voit, cette attraction n'est pas négligeable, étant donné surtout que, dans l'industrie, on se trouve parfois en présence de dissymétries magnétiques encore plus grandes.

Dans la pratique, on veillera à ce que la valeur des dissymétries dans l'entrefer ne dépasse jamais 1/10 de cet entrefer.

On peut remarquer que l'attraction magnétique provenant d'une dissymétrie dans l'entrefer donne une force à peu près constante en direction et en intensité, surtout si le nombre de pôles est grand. Il en résulte, par suite, simplement une fatigue supplémentaire pour l'arbre, mais *pas de vibrations sensibles.*

L'attraction magnétique, ayant ordinairement la même direction que la pesanteur et le même point d'application sur l'arbre, s'ajoutera simplement au poids de l'inducteur.

On calcule donc l'arbre pour résister à la flexion, comme si c'était une poutre encastrée à ses deux extrémités, et soumise en un point à une force égale à la somme de la pesanteur et de l'attraction magnétique.

Il peut se produire aussi une attraction magnétique non équilibrée lorsque des spires sont en court-circuit dans une bobine inductrice.

Dans ce cas, la force agissant sur l'inducteur tourne avec celui-ci et détermine donc de très *fortes vibrations.*

Equilibrage dynamique de l'inducteur. — Comme toutes les pièces tournantes, l'inducteur doit être équilibré mécaniquement pour éviter les vibrations.

Pour cela, on fait reposer l'arbre sur deux règles bien horizontales et l'on fixe solidement des contrepoids jusqu'à ce que la partie tournante soit en équilibre dans n'importe quelle position.

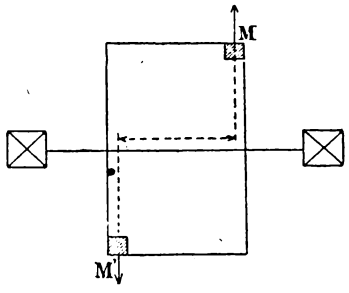


Fig. 109. — Nécessité de l'équilibrage dynamique du rotor dans le cas de machines à très grande vitesse.

Pour les turbo-alternateurs, à cause de la très grande vitesse et de l'allongement considérable de l'inducteur, il est indispensable de procéder, en plus, à ce que l'on appelle l'équilibrage dynamique.

Si, en effet, on considère deux masses M et M' égales, disposées dans un plan diamétral comme l'indique la figure, ces masses pourront donner naissance à un couple important qui fatiguerait l'arbre et les paliers et produirait des vibrations (fig. 109).

Pour réaliser l'équilibrage dynamique du rotor, on le fait tourner au moyen d'une courroie verticale en le faisant reposer sur des paliers pouvant se déplacer horizontalement. S'il y a un défaut d'équilibre, c'est-à-dire un balourd, le rotor oscille autour d'un axe vertical. Pour augmenter l'amplitude des oscillations et rendre l'équilibrage plus sensible, on maintient chacun des paliers au moyen de deux ressorts horizontaux opposés l'un à l'autre. Lorsque l'on parvient à la vitesse qui détermine un nombre de vibrations correspondant au nombre d'oscillations naturelles du système constitué par le rotor et les ressorts, il y a *résonance* et l'amplitude des oscillations du rotor est relativement très grande, même pour de très petits balourds. On équilibre alors le rotor en ajoutant des masses par tâtonnement jusqu'à ce que l'amplitude des oscillations soit devenue négligeable.

Calcul à la Torsion seule. — On peut considérer l'arbre comme encastré dans la partie tournante et soumis à un couple de torsion provenant du couple moteur qui s'exerce sur la poulie ou le manchon d'accouplement.

Ce couple agit donc sur toutes les sections comprises entre la partie mobile et la poulie ou le manchon.

La théorie de la résistance des matériaux donne pour la torsion la relation

$$R_t = \frac{\mu\ V}{I}$$

en désignant par

R_t, le travail pratique du métal (taux de sécurité à la torsion)
μ le moment de torsion
I le moment d'inertie
V la distance de la fibre la plus fatiguée à la fibre neutre
C le couple moteur égal au couple de torsion
d le diamètre de l'arbre

comme

$$\mu = C$$

$$I = \text{(Section cirulaire)}\ \frac{\pi d^4}{32}$$

$$V = \frac{d}{2}$$

On aura :

$$R_t = \frac{C\frac{d}{2}}{\pi\frac{d^4}{32}}$$

d'où :

$$d = \sqrt[3]{\frac{16\ C}{\pi\ R_t}}$$

Mais comme

$$C = \frac{P}{\omega}$$

P = puissance motrice

$$\omega = \text{vitesse angulaire} = \frac{2\pi N}{60}$$

on aura facilement :

$$d = A\sqrt[3]{\frac{N}{P}}$$

formule d'après laquelle

d = diamètre de l'arbre en cm
P = puissance de la machine en watts
N = nombre de tours par minute
A = C^{te} dépendant du travail adopté pour le métal.

D'après Arnold, qui a effectué des mesures sur un grand nombre de machines, A varie de 1,8 à 2,3.

D'après Fischer-Hinnen :

A = 2,3 fer forgé
A = 2,1 acier

En général, on choisit A pour que le métal ne travaille pas à la torsion à plus de 7 kilogrammes par millimètre carré.

Calcul à la Flexion seule. — L'attraction magnétique due à la dissymétrie dans l'entrefer ayant ordinairement la même direction que la pesanteur et le même point d'application sur l'arbre, s'ajoutera simplement au poids de la partie tournante.

On calculera donc l'arbre pour résister à la flexion, comme si c'était une poutre fixée sur deux appuis et soumise en un point P à une force.

On a alors, pour le moment de flexion maximum qui se trouve au point P :

$$\mu = f_1 l_1 = f_2 l_2$$

Or comme :

$$f_1 + f_2 = F_p$$

$$\mu = F_p \frac{l_1 l_2}{a}$$

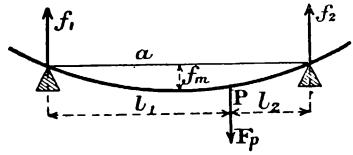


Fig. 110. — Calcul de l'arbre à la flexion seule.

Pour la flèche maximum qui ne se trouve au point P que lorsque P est au milieu de a :

$$\lambda_m = \frac{F_p l_1^3 l_2}{9\sqrt{3} E I a}\sqrt{\left(1 + 2\frac{l_2}{l_1}\right)^3}$$

où :

λ est la flèche en cm.
F_p, la force due à la pesanteur et à l'attraction magnétique en kgs.
a, l_1, l, longueurs évaluées en cm.
d = diamètre de l'arbre en cm.
E = coefficient d'élasticité de l'acier = $2{,}1 \times 10^6$ kgs par cm².

Dans le cas particulier où $l_1 = l_2$, c'est-à-dire lorsque la force F_p agit au milieu de l'arbre, on trouve facilement que les formules précédentes deviennent :

$$\mu = \frac{F p\, a}{4}$$

$$\lambda_m = \frac{F a^3}{48\, EI}$$

Connaissant le moment fléchissant μ, on utilisera alors la formule classique :

$$R_f = \frac{\mu V}{I}$$

qui donne, en remplaçant V et I par leurs valeurs :

$$V = \frac{d}{2} \qquad I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot \mu}{\pi\, R_f}} = 2{,}2 \sqrt[3]{\frac{\mu}{R_f}}$$

d = diamètre de l'arbre en cm.
μ = moment fléchissant en kgs par cm².
R_f = travail du métal à la flexion en kgs par cm².
R_f varie 4 à 6 kgs par $^m/_{in^2}$ pour les grandes vitesses angulaires.
R_f — 6 kgs par $^m/_{in^2}$ pour 1.000 tours par minute.
— 7 kgs par $^m/_{in^2}$ pour les faibles vitesses.

Si μ représente le moment de flexion maximum, on détermine ainsi le diamètre de l'arbre, mais il serait peu logique de donner à l'arbre

un diamètre uniforme, puisque le moment de flexion n'est pas le même partout.

On détermine donc le moment de flexion en différents points et l'on calcule le diamètre en ces différents points, en appliquant la formule générale précédente.

Réaction de la courroie sur l'arbre. — On sait que si T est la tension du brin conducteur, T′ la tension du brin conduit

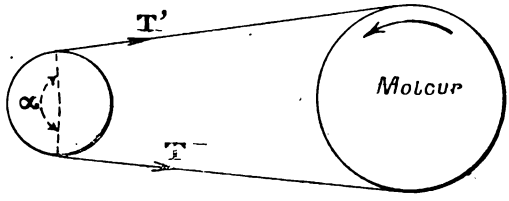


Fig. 111. — Réaction de la courroie sur l'arbre.

on aura :

$$T - T' = F = \frac{P \times 75 \times 60}{2 \pi R N} \quad (1)$$

ou :

F, force tangentielle en kgs.
P, puissance en chevaux.
R, rayon de la poulie en mètres.
N, nombre de tours par minute de la poulie

On sait également que pour que la courroie ne glisse pas, il faut que :

$$\frac{T}{T'} = a\, e^{f\alpha} \quad (2)$$

formule dans laquelle f est le coefficient de frottement, α l'angle en radians embrassé par la courroie, a un coefficient < 1. C'est un coefficient de sécurité.

Pour ne pas exagérer la tension de la courroie qui fait fléchir l'arbre, on prendra a très voisin de 1. En général on fait $a = 0{,}90$.

En se servant des deux expressions (1) et (2), on détermine facilement T et T'.

Ces deux tensions T et T' donnent évidemment un couple qui est le couple moteur, et une force résultante F' passant par l'axe (fig. 112).

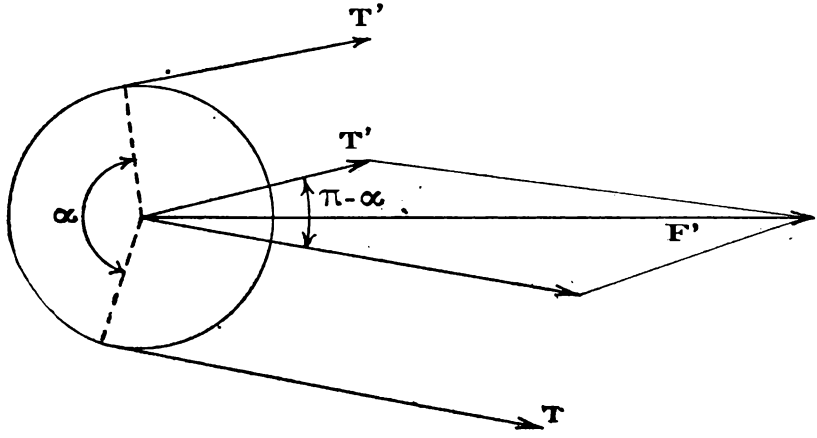


Fig. 112. — Composition des tensions dues à la courroie.

On a :

$$F'^2 = T^2 + T'^2 + 2TT' \cos\alpha$$

En particulier si :

$$\alpha = \pi$$

on a :

$$F' = T + T'$$

et, si dans ce cas, on prend :

$$a = 1 \text{ et } f = 0{,}155 \text{ (valeur moyenne)}$$

on aura :

$$T = 2{,}5\ F \text{ (F, force tangentielle)}$$
$$T' = 1{,}5\ F$$

d'où :

$$T + T' = F' = 4F$$

Dans ce cas, la force agissant sur l'arbre, due à la courroie, serait donc égale à quatre fois la force tangentielle s'exerçant sur la poulie.

Pour $\alpha < \pi$, F′ pour les mêmes coefficients serait évidemment plus faible. Cependant en pratique pour tenir compte de $a < 1$, on admet souvent d'une façon générale, pour avoir un maximum, que :

$$F' = 4F$$

Action de F′, réaction de la courroie

1° Cas de deux paliers. — En plus des efforts étudiés précédemment, on devra calculer l'arbre pour qu'il puisse résister au moment de flexion F′l (l étant la distance du milieu de la poulie au milieu du coussinet).

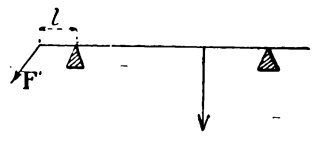


Fig. 113. — Réaction de la courroie. Cas de deux paliers.

2° Cas de trois paliers. — On démontre que les efforts agissant sur la portion de l'arbre A_1A_2 ont peu d'action sur la portion A_2A_3.

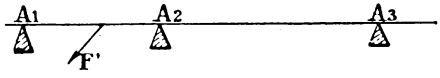


Fig. 114. — Réaction de la courroie. Cas de trois paliers.

On considérera donc l'arbre comme formé de deux parties que l'on calculera séparément.

Arbres pour très grandes vitesses

Pour les arbres à très grande vitesse (1.500 à 3.000 tours) destinés, par exemple, aux machines commandées directement par turbines à vapeur, on envisagera les efforts de flexion dus à la force centrifuge

qui produit une résultante agissant sur l'arbre par suite des flèches légères de celui-ci.

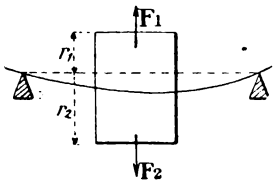


Fig. 115. — Force centrifuge dans le cas des arbres à très grandes vitesses.

Dans la fig. 115, la résultante due à la force centrifuge serait pour deux masses m placées symétriquement à la périphérie :

$$F_c = F_2 - F_1.$$

$$F_c = mr_2\,\omega^2 - mr_1\,\omega^2.$$

$$F_c = m\,\omega^2\,(r_2 - r_1).$$

On voit que lorsque ω est grand, F_c peut être très considérable même si la flèche $(r_2\text{-}r_1)$ est petite.

Il faudra donc surtout tenir compte de ces efforts et prendre des coefficients de sécurité plus grands.

Action gyrostatique

Cette action n'est à considérer que dans le cas de machines à grande vitesse placées à bord des navires. Elle est due à la tendance que possède l'axe de rotation de rester toujours dans la même direction.

La force gyrostatique peut être déterminée par la formule suivante donnée par Lord Kelvin :

$$F = \frac{F_p\,K^2\,\Omega\,\omega}{gl}$$

où :

F = force gyrostatique en kgs.
Fp = poids de la partie tournante en kgs.
l = longueur en cm entre les coussinets.
g = accélération de la pesanteur (981 cm par sec.).
ω = vitesse angulaire de la partie tournante en radians par seconde.
Ω = vitesse angulaire maximum de roulement du navire en radians par seconde.
K = rayon de gyration de la partie tournante en cm.

Calcul des efforts agissant sur les coussinets

La connaissance de ces efforts est nécessaire pour permettre de calculer les tourillons de l'arbre.

1° Pas de courroie. — On a évidemment :

$$f_1 + f_2 = Fp$$

et

$$f_1 l_1 = f_2 l_2.$$

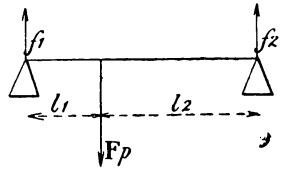


Fig. 116. — Efforts sur les coussinets. Pas de courroie.

Si f_1 et f_2 représentent la réaction des coussinets.

2° Cas de la commande par courroie. Avec deux paliers. — F_p donne comme précédemment f_1 et f_2; F produit deux réactions, f' et f''. On a :

$$f' = F' + f''$$
$$F' l = f'' L.$$

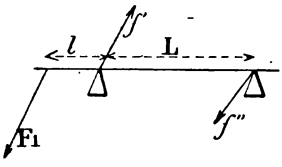


Fig. 117. — Efforts sur les coussinets. Commande par courroie. Cas de deux paliers.

On compose ensuite f_1 avec f' et f_2 avec f''.

Avec trois paliers. — La figure 118 montre quelles seraient évidemment les réactions des coussinets. On compose f_1 et f'.

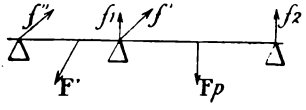


Fig. 118. — Efforts sur les coussinets. Commande par courroie. Cas de trois paliers.

Tourillons

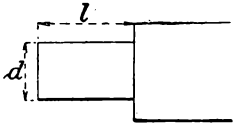


Fig. 119.— Calcul des tourillons.

Il faut déterminer :

d = le diamètre du tourillon;
l = la longueur.

Détermination de *d*. — On donnera à d une valeur suffisante

pour que le tourillon puisse résister aux efforts qui agissent sur lui (torsion et flexion). S'il est indispensable pour les tourillons de présenter une très grande solidité, il ne faudrait pas cependant exagérer inutilement le diamètre d, car la puissance perdue par frottements dans les paliers deviendrait trop considérable. Calculons en effet cette puissance.

Soit :

F la force en kgs agissant sur le tourillon.
f le coefficient de frottement.
V la vitesse tangentielle du tourillon.
N le nombre de tours par minute.

On aura pour la puissance perdue par frottements dans un palier :

$$P_f = F f V = F f \frac{\pi d N}{60} \qquad (1)$$

On voit que cette puissance est proportionnelle au diamètre d. On remarque, d'autre part, que cette puissance est indépendante de l longueur du tourillon, ce qui est naturel puisque la force de frottement est indépendante de la surface.

Si l'on exprime :

F en kgs
d en cm.

La puissance perdue sera exprimée en watts par la formule suivante :

$$Pf = 0{,}53\, F f\, dN$$

Or, f varie de 0,03 à 0,08 suivant le graissage et la pression de l'arbre sur les coussinets qui est normalement de 8 à 11 kg. par cm.²

Calcul de l (longueur du tourillon. — Pour que la puissance perdue P_f ne produise pas un échauffement exagéré et d'autre part, pour éviter une usure anormale des coussinets et l'expulsion de l'huile par une pression trop grande, il faudra donner au tourillon une surface suffisante.

Donc, l sera calculé en se basant sur la nécsesité de donner une certaine limite :

1° à w puissance perdue par unité de surface de travail en watts par cm²;

2° à p pression par unité de la surface de travail, qui est égale à ld.

1° CONDITION MAXIMUM DE ϖ. — On a :

$$w = \frac{0{,}53\ \mathrm{F} f\ d\ \mathrm{N}}{ld}$$

d'où

$$(A) \qquad l < \frac{0{,}53\ \mathrm{F} f\ \mathrm{N}}{w}$$

L'expérience montre que w ne doit pas dépasser 5 à 10 watts par cm² de surface de travail.

On fera donc :

$$w < 10$$

On peut encore mettre la relation (A) sous la forme suivante en remarquant que $\frac{0{,}53\ f}{w}$ est une constante pour un palier donné.

$$l > \mathrm{KNF}$$

d'où la relation pratique suivante, en prenant pour K une valeur moyenne :

$$(A') \qquad l > 0{,}003\ \mathrm{NF}$$

2° CONDITION MAXIMUM DE p. — On a :

$$p = \frac{\mathrm{F}}{ld}$$

F = force agissant sur le coussinet, d'où :

$$(B) \qquad l \geqslant \frac{F}{pd}$$

p ne doit pas dépasser 15 à 20 kgs par cm².
En pratique on prend souvent :

$$p = 10 \text{ à } 11 \text{ kgs}$$

Dans un avant-projet, il est prudent de faire :

$$p = 5 \text{ à } 7 \text{ kgs.}$$

Ainsi, l sera déterminé pour satisfaire aux deux conditions A ou A' et B.

Forme de l'arbre. — La figure 120 indique une forme d'arbre assez générale. On remarque :
Le collet qui sert à limiter le jeu latéral de l'arbre.

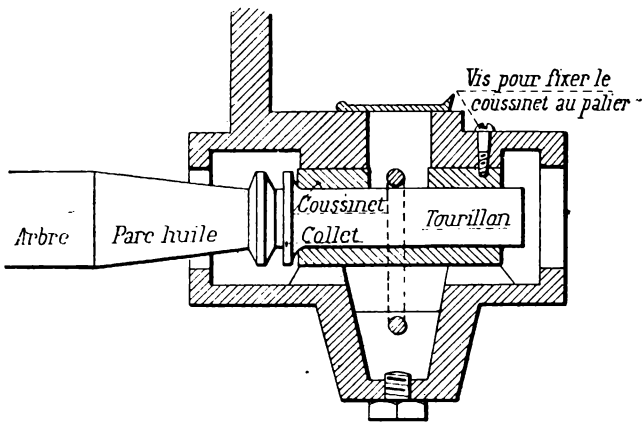


Fig. 120. — Forme de l'arbre.

Le pare-huile destiné à empêcher que l'huile ne sorte du palier en suivant l'arbre. Par suite de la force centrifuge, l'huile est projetée dans la chambre du palier et ne peut pas redescendre de l'autre côté du pare-huile.

Coussinets-Paliers

On a vu que les efforts agissant sur les coussinets et les paliers sont souvent assez considérables et que d'autre part, à cause de l'attraction magnétique, les dissymétries dans l'entrefer doivent être toujours très faibles. On comprend donc maintenant combien il est important d'assurer aux paliers une très grande rigidité et aux coussinets une usure très faible ainsi qu'un centrage très précis.

La figure 120 représente la coupe d'un palier pour une machine d'une dizaine de chevaux.

Coussinets

Ils sont :

Soit en bronze composé de Cu, Sn et Zn dans des proportions variables;

Soit en métal dit antifriction, alliage de cuivre, d'étain et d'antimoine également en proportions variables.

	Cu	Sn	St
Métal Magnolia.....	8	80	12
Métal blanc.....	6	17	77
—	54	3 à 9	36

Le bronze est plus dur, s'use moins que l'anti-friction, aussi est-il employé là où une usure trop grande des coussinets aurait de fâcheuses conséquences, par exemple pour les petits moteurs asynchrones où l'entrefer étant très faible, 3/10 à 5/10 de mm, on doit redouter le contact du rotor avec le stator, par suite de l'usure des coussinets.

Le bronze a, par contre, l'inconvénient grave de rayer l'arbre et de se souder après lui en cas de grippage, ce qui nécessite une réparation généralement assez longue pour enlever le bronze et repolir les tourillons.

L'antifriction présente justement l'avantage de ne pas abîmer l'arbre en cas de grippage; car, ayant une température de fusion assez basse, il fond simplement sans rayer l'arbre. Cette facilité de fusion rend également la préparation des coussinets très facile. Aussi, dans les machines électriques, emploie-t-on actuellement de plus en plus l'antifriction, même pour les très grosses machines, car l'antifriction peut acquérir une dureté assez grande.

Pour éviter que, dans le cas d'un faible entrefer, la fusion du coussinet en antifriction, lors d'un groppage, n'amène la partie tournante en contact avec la partie fixe, on établit parfois des coussinets en bronze revêtus d'une mince couche d'antifriction.

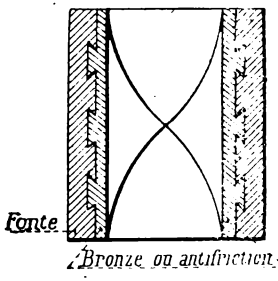


Fig. 121. — Coussinets.

Le bronze ou l'antifriction sont bien ajustés sur le coussinet qui présente des agrafes avec profil en queue d'aronde, ou bien, ce qui se fait très souvent, coulés directement sur le coussinet.

On crée des rainures appelées patte d'araignée pour faciliter le graissage. Ces rainures doivent avoir leur bord très arrondi.

Sauf dans les machines marines, le graissage se fait presque toujours avec bague. Les bagues doivent être en métal non magnétique, plonger suffisamment dans l'huile et tourner à une vitesse convenable. Si la bague tourne trop vite, l'huile passe par-dessus le coussinet sans le lubrifier; dans le cas contraire, la circulation d'huile n'est pas assez intense. On règle cette vitesse par la largeur de la bague, c'est-à-dire en diminuant ou en augmentant la surface d'adhérence de la bague avec le tourillon.

Modes de fixation des coussinets dans les paliers.

On peut distinguer trois modes de fixation :

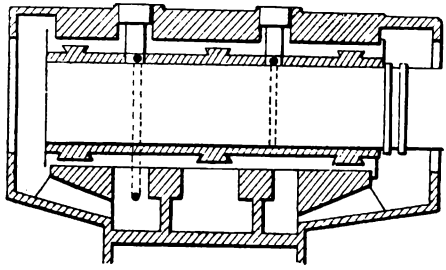


Fig. 122. — Fixation rigide des coussinets dans les paliers.

1° Le mode de la figure 122. Le coussinet est fixé rigidement dans le palier. C'est le mode de fixation le plus économique.

2° Le coussinet à rotule (fig. 123) permettant à l'arbre de prendre une certaine inclinaison dans le palier et exigeant un ajustage moins

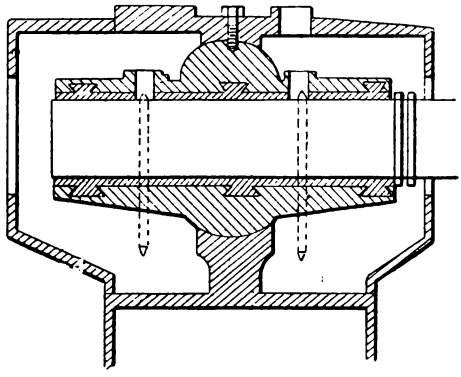


Fig. 123. — Coussinet à rotule.

précis que pour le premier. Ce dispositif, qui est assez coûteux, n'est employé que dans le cas des grandes vitesses (dynamos pour turbines à vapeur).

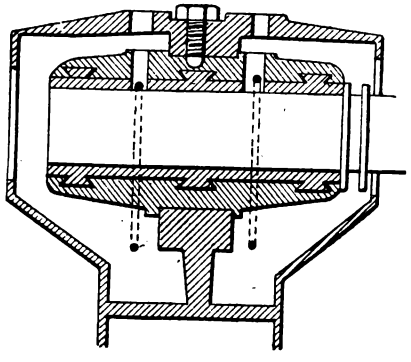


Fig. 124. — Coussinet de type mixte.

3° Le coussinet mixte servant d'intermédiaire entre les deux premiers. Est assez compliqué, mais assez employé car, tout en étant

moins coûteux que le second, il permet à l'arbre de prendre une inclinaison suffisante toujours très faible (quelques centièmes de millimètre).

Echauffement des coussinets. — La surélévation de température des coussinets ne doit pas dépasser de plus de 40 à 50° la température ambiante.

On a vu les dimensions à donner aux tourillons et par suite aux coussinets pour avoir un échauffement normal.

On peut réduire ces dimensions, surtout dans le cas de grandes machines, en refroidissant artificiellement les coussinets par une circulation d'eau dans un serpentin qui les entoure.

Paliers

Ordinairement en fonte. Il faut que :

1° Les paliers puissent être très facilement démontables;

2° Le réservoir d'huile soit d'un volume assez grand;

3° Le nettoyage puisse se faire facilement. On peut à cet effet disposer le fond du réservoir d'huile en pente pour y rassembler les impuretés et déchets;

4° Le palier renferme un niveau d'huile apparent, un trop-plein et un trou de vidange;

5° La partie tournante formant ventilateur n'aspire pas l'huile du palier.

Chaise support du palier. — En fonte ordinairement. En acier coulé parfois, lorsqu'elle ne fait qu'une seule pièce avec la carcasse. Elle peut reposer sur le bâti, soit par une surface plane, soit par surface cylindrique (coûteux, mais facilite le centrage de l'arbre, fig. 125 et 126).

Dans les petites machines jusqu'à 100 kw au maximum, on emploie presque toujours le palier dit en bouclier (fig. 135).

Par raison d'économie, les paliers sont quelquefois indépendants du bâti, ce qui exige un montage soigné. Il peut se produire dans la maçonnerie de légères déformations, suffisantes pour décentrer les

paliers et les faire chauffer; il faut alors que les fondations soient solides et il convient de vérifier de temps en temps le centrage des paliers.

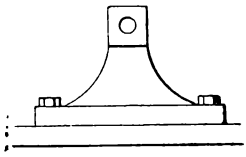


Fig. 125. — Chaise de palier à base plane.

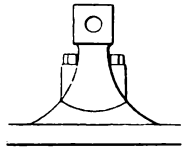


Fig. 126. — Chaise de palier à base cylindrique.

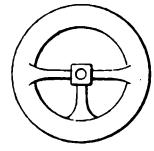


Fig. 127. — Palier bouclier (petites machines).

ROUE POLAIRE

La roue polaire est presque toujours exécutée en acier coulé pour réduire son poids, en raison de la grande perméabilité de l'acier, et afin de pouvoir faire tourner cette roue polaire à des vitesses tangentielles assez considéables, voisines de 40 mètres par seconde. Dans les machines à vitesse lente, la roue polaire devant jouer le rôle de volant et par conséquent avoir un poids assez grand, on emploie la fonte, qui a l'avantage sur l'acier d'être moins coûteuse et de se couler plus facilement.

Lorsqu'elle est en une seule pièce, la roue polaire est fixée directement sur l'arbre au moyen de la presse hydraulique, et clavetée solidement. Pour les alternateurs puissants et de grand diamètre, la roue polaire est faite en deux ou quatre pièces, pour faciliter le transport et le montage. Les différentes parties doivent être réunies ensemble à la jante et au moyeu par de forts boulons avec écrous et contre-écrous.

On donne toujours à la jante de la roue polaire des dimensions assez grandes pour lui permettre de laisser passer le flux avec une induction relativement faible.

La roue polaire se calcule comme un volant, mais il faut avoir soin d'ajouter aux efforts dus à la force centrifuge, les attractions magnétiques qui, nous l'avons vu, sont loin d'être négligeables.

NOYAUX POLAIRES

Ils sont toujours en acier coulé ou en tôle.

La perméabilité des noyaux polaires doit être, en effet, choisie aussi grande que possible afin de permettre de réduire au minimum leur section, et par suite les dimensions et le poids de cuivre des bobines inductrices.

Les noyaux polaires sont massifs ou feuilletés (c'est-à-dire formés de tôles isolées).

Pôles massifs. — Ils ont les avantages suivants :

1° D'être de construction plus simple et moins coûteuse;

2° D'être plus faciles à fixer solidement sur la jante de la roue polaire;

3° D'étouffer les harmoniques du courant de l'induit et, dans le cas du couplage en parallèle, d'amortir les oscillations pendulaires. En un mot, ils jouent le rôle d'amortisseurs.

Inconvénients des pôles massifs. — Les pôles massifs ont l'inconvénient d'être le siège de courants de Foucault assez intenses, dans le cas des induits dentés à encoches complètement ouvertes, surtout si l'entrefer est faible par rapport à l'ouverture des encoches.

On a vu, en effet, précédemment, que la présence des encoches, en créant des réluctances assez considérables, avait pour effet de répartir irrégulièrement le flux sur la surface polaire.

On aura donc dans le pôle, par suite du déplacement de l'induit, des variations d'état magnétique qui ne seront pas très considérables comme amplitude, mais dont la fréquence sera très élevée, puisque cette fréquence dépend du nombre de dents.

Ces variations d'induction dans les pôles produiront des courants de Foucault assez intenses, qui pourront donner lieu à une perte notable d'énergie.

On sera obligé, dans ce cas, de feuilleter les pôles.

Pôles feuilletés. — Les pôles doivent être feuilletés évidemment dans le même sens que celui déjà indiqué pour l'induit, c'est-à-dire perpendiculairement à l'arbre.

Les tôles sont maintenues entre elles par des boulons qui doivent être isolés, tout au moins ceux qui sont placés à la périphérie.

Comme les courants de Foucault ne prennent naissance que dans les épanouissements polaires, on pourrait se borner à ne feuilleter que les pièces polaires, laissant les noyaux massifs; mais, étant données les difficultés que l'on rencontre à fixer ces pièces polaires feuilletées, on préfère le plus souvent feuilleter entièrement les noyaux polaires.

Dimensions des noyaux polaires (*longueur et section*). — La longueur des noyaux polaires doit être suffisante pour permettre de placer convenablement les bobines inductrices, dont l'épaisseur ne doit pas être trop forte pour qu'elles puissent se refroidir facilement.

La section est déterminée par la condition de laisser passer le flux inducteur avec une certaine induction.

Il faut évidemment que la section se rapproche le plus possible de la section circulaire, pour réduire au minimum le cuivre des bobines inductrices.

Efforts agissant sur les noyaux polaires. — Les noyaux polaires doivent être fixés très solidement à la jante, car ils ont à résister aux efforts très considérables dus à la force centrifuge.

L'attraction magnétique n'a pas à être envisagée dans ce cas, car

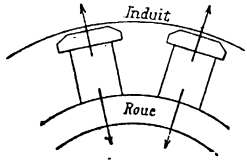


Fig. 128.

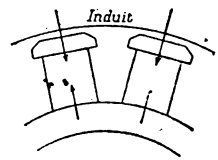


Fig. 129.

Actions magnétiques sur les noyaux polaires.

si les noyaux polaires sont attirés par l'induit, ils le sont également par la roue.

Les deux schémas des figures 128 et 129 qui représentent, l'un les forces dues à l'attraction magnétique s'exerçant sur le noyau, l'autre celles qui s'exercent sur l'induit et la roue polaire, montrent suffisamment de quelle façon agissent les attractions magnétiques.

Comme l'induction est plus forte au passage du noyau qu'à la sortie de l'épanouissement polaire, le noyau est attiré plus fortement par la roue que par l'induit, mais, dans les calculs, on ne tient pas compte de cette différence qui aurait pour effet, cependant, de réduire l'action de la force centrifuge.

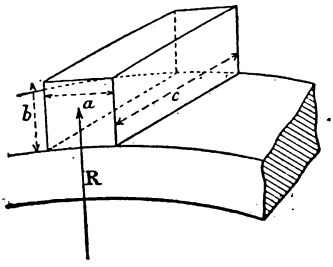


Fig. 130. — Détermination de la force centrifuge s'exerçant sur les noyaux polaires.

Calcul de la force centrifuge s'exerçant sur les noyaux polaires. — Considérons, pour simplifier, un noyau polaire rectangulaire et dépourvu d'épanouissement polaire (fig. 130).

La force centrifuge F_c qui s'exerce sur ce noyau et qui tendra à l'arracher de la roue polaire, sera :

$$F_c = MR\omega^2$$

formule dans laquelle :

M = masse du noyau = volume × par densité.

R = rayon de la circonférence décrite par le centre le gravité du noyau.

ω = vitesse angulaire $= 2\pi R \frac{N}{60}$

La formule ci-dessus est pratiquement exacte, car R étant toujours relativement très grand par rapport à *b*, peut être confondu avec le rayon de gyration.

Application. — Soit le cas d'un alternateur triphasé de 1.000 kilowatts dans lequel on a :

a = 20 centimètres.
b = 15 —
c = 37 —
R = 112 —
N = 214 tours par minute.

On aura :

$$M = 20 \times 15 \times 37 \times 7{,}8 = 86.580 \text{ grammes.}$$

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2\pi.215}{60} = 22{,}39,$$

d'où :

$$F_c = 86.580 \times 112 \times (22{,}39)^2 \text{ dynes}$$

$$F_c = \frac{86.580 \times 112 \times (22{,}39)^2}{981 \times 1000 \times 1000} \text{ tonnes}$$

$$F_c = 4{,}96 \text{ tonnes, soit 5 tonnes.}$$

Dans les alternateurs de puissance importante, et tournant avec une grande vitesse angulaire, la force centrifuge par pôle peut dépasser largement 10 tonnes.

Calcul de l'attraction magnétique des pôles inducteurs

Les pôles inducteurs agissant comme des électro-aimants produisent sur l'induit une attraction assez considérable. Cette attraction peut se calculer par la formule classique de la force portante :

$$F = \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi}$$

qui devient :

$$F = \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi \times 981 \times 1000} = \frac{\mathcal{B}^2 S}{25.000.000}$$

si

F = attraction du pôle en kg.
$\mathcal{B}$ = induction dans l'entrefer en Gauss.
S = surace polaire en cm².

Pour $\mathcal{B}$ = 10.000 gauss, par exemple l'attraction magnétique vaut 4 kg. par cm², c'est-à-dire que 4 kg. correspondant au poids de 500 cm² de fer, l'attraction magnétique serait suffisante pour soutenir dans l'air une épaisseur de fer de 5 mètres.

On voit que cette attraction est considérable et qu'il ne faut pas la négliger dans le calcul des pièces mécaniques.

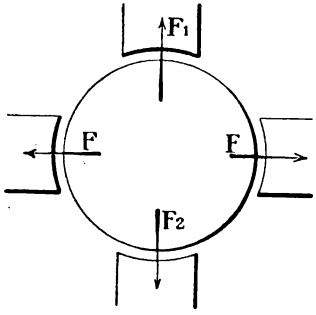


Fig. 131. — Création d'une résultante des attractions magnétiques.

Résultante des attractions magnétiques. — Si toutes les forces dues aux attractions magnétiques sont égales, la résultante de ces forces est nulle.

Dans le cas contraire, on a une résultante agissant sur l'arbre pouvant avoir des effets très nuisibles.

Causes de cette résultante. — 1° Dissymétrie dans l'entrefer. Par suite de l'usure des coussinets, d'un défaut de montage ou de l'affaissement de la fondation des paliers, lorsque ceux-ci ne sont pas liés rigidement à la carcasse, il peut se produire des dissymétries dans l'entrefer. L'entrefer à la partie inférieure devenant par exemple plus faible que celui de la partie supérieure, l'induction peut augmenter dans la première partie pour diminuer dans la seconde.

Dans les machines bipolaires, on pourrait croire que puisque le flux ($\mathcal{B}S$) qui entre d'un côté doit évidemment ressortir par l'autre, il ne peut pas y avoir de résultante. Il convient de remarquer alors que l'attraction magnétique étant exactement $\int \mathcal{B}^2 dS$ peut par conséquent être différente sur les deux faces, bien que $B_{moy}S = \Phi_p$ reste le même.

Avec une machine bipolaire, on peut créer une résultante en faisant faire aux axes des pôles un certain angle (fig. 132).

On peut obtenir ainsi une résultante s'opposant au poids de l'induit et permettant de soulager les paliers.

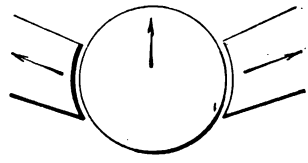


Fig. 132. — Création d'une résultante des attractions magnétiques par inclinaison des pôles.

2° Soufflures, défauts de perméabilité dans un pôle.

3° Spires en court-circuit dans la bobine d'un pôle inducteur.

Cet accident est surtout à redouter, avec les alternateurs dont l'inducteur est actuellement pris toujours tournant.

Il se produit alors de très fortes vibrations pouvant compromettre la construction des alternateurs.

Calcul de la résultante des attractions magnétiques. — 1° Dynamo à 4 pôles, les pôles étant axés suivant le diamètre vertical et le diamètre horizontal. Soit :

$\mathcal{E}$ entrefer normal.

$\mathcal{E}_1$ — à la partie supérieure.

$\mathcal{E}_2$ — à la partie inférieure.

Nous supposons $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$.

On peut admettre que l'entrefer des pôles S placés suivant le diamètre horizontal $= \mathcal{E}$, entrefer normal.

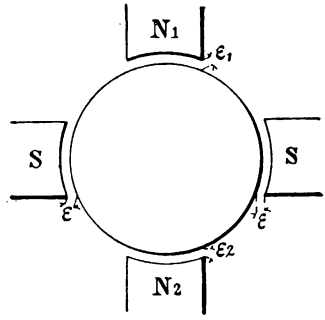


Fig. 133. — Calcul de la résultante des attractions magnétiques.

On a :

$$\frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2}{2} = \mathcal{E}$$

Soit x le décentrage :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E}_1 = +x \\ \mathcal{E}_2 = \mathcal{E} - x \end{array} \right.$$

d'où :

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = 2x$$

La force portante d'un pôle étant donnée par la formule :

$$F = \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi}$$

si :

$\mathcal{B}_1$ = induction du pôle N_1

$\mathcal{B}_2$ = — — N_2

La force agissant sur l'arbre, résultante des attractions magnétiques sera :

$$F_r = \frac{\mathcal{B}^2_1 - \mathcal{B}^2_2}{8\pi} S \quad \text{(S surface polaire)}$$

Déterminons $\mathcal{B}_1$ et $\mathcal{B}_2$.

Si nous admettons que la force magnétomotrice $\mathcal{F}$ est la même pour tous les pôles, on aura pour les flux Φ_1 et Φ_2 sortant des pôles N_1 et N_2, en appelant $\mathcal{R}_t$ la réluctance totale du circuit magnétique en temps normal, c'est-à-dire sans décentrage.

$$\Phi_1 = \mathcal{B}_1 S = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_t + \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}}{S}}$$

$$\Phi_2 = \mathcal{B}_2 S = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_t + \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}}{S}}$$

d'où :

$$\frac{\mathcal{B}_1}{\mathcal{B}_2} = \frac{\mathcal{R}_t + \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}}{S}}{\mathcal{R}_t + \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}}{S}}$$

et :

$$\frac{\mathcal{B}_2 - \mathcal{B}_1}{\mathcal{B}_1} = \frac{\frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{S}}{\mathcal{R}_t + \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}}{S}} = \frac{\frac{2x}{S}}{\mathcal{R}_t + \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}}{S}}$$

d'autre part :

$$\frac{\mathcal{B}_1 + \mathcal{B}_2}{2} = \mathcal{B}_{moy} \text{ (induction moyenne)}$$

d'où :

$$Fr = \frac{S}{8\pi}\left[\frac{2\mathcal{B}_{moy} \times \frac{2x\mathcal{B}_1}{S}}{\mathcal{R}_t + \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}}{S}}\right] = \frac{1}{2\pi}\frac{\mathcal{B}_{moy}\mathcal{B}_1 x}{\mathcal{R}_t + \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}}{S}}$$

Or :

$$\frac{\mathcal{B}_2}{\mathcal{R}_t + \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}}{S}} = \frac{\mathcal{B}_1}{\mathcal{R}_t + \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}}{S}} = \frac{\mathcal{B}_1 + \mathcal{B}_2}{2\,\mathcal{R}_t + \frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2}{S} - \frac{2\,\mathcal{E}}{S}} - \frac{\mathcal{B}_{moy}}{\mathcal{R}_t}$$

d'où :

$$F_r = \frac{4\,\mathcal{B}^2_{moy} x}{8\pi \mathcal{R}_t}$$

On peut écrire :

$$\mathcal{R}_t = \frac{\mathcal{R}_t}{\frac{2\,\mathcal{E}}{S}} \frac{2\mathcal{E}}{S}$$

posons :

$$\alpha = \frac{\mathcal{R}_t}{\frac{2\,\mathcal{E}}{S}}$$

Ainsi, α est le rapport de la réluctance totale du circuit magnétique sans décentrage à la réluctance du double de l'entrefer normal.

On aura finalement :

$$F_r = \frac{2\,\mathcal{B}^2 S\, x}{8\pi\alpha\mathcal{E}} \text{ dynes}$$

Ou encore :

$$F = \frac{2\mathcal{B}^2 S\, x}{25.10^6 \alpha} \text{ kgs} \qquad (2)$$

F sera exprimé en kgs si $\mathcal{B}$ est en gauss et S x $\mathcal{E}$ en cms.

2° *Dynamo à 4 pôles, les pôles étant sur deux diamètres inclinés à 45°.* — On peut admettre que l'on a sensiblement encore :

$$\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = 2\,\mathcal{E}$$

et

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = x$$

puisque dans le cas précédent on avait pour les pôles N_1 N_2 :

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = 2x$$

et que pour les pôles S la différence d'entrefer est ordinairement nulle.

Les 4 pôles produisent 4 flux, φ, φ', φ_1, φ_2. Les deux flux φ et φ' sont égaux et produisent des forces d'attraction égales et opposées qui s'annulent.

Cherchons la valeur de la résultante des forces dues à φ_1 et φ_2.

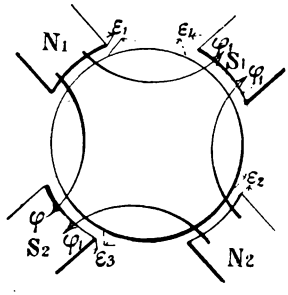


Fig. 134. — Résultante d'attraction magnétique dans le cas d'une dynamo quadripolaire.

La résultante des forces f_2 (forces d'attraction de N_2 et S_2) a pour valeur :

$$F_2 = \frac{2}{\sqrt{2}} f_2 = \frac{2}{\sqrt{2}} \frac{\mathcal{B}^2_2 \frac{S}{2}}{8\pi}$$

$$F_2 = \frac{\mathcal{B}^2_2 S}{\sqrt{2}.\,8\pi}$$

de même :

$$F_1 = \frac{\mathcal{B}^2_1 S}{\sqrt{2}\,8\pi}$$

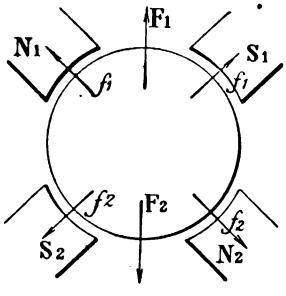


Fig. 135. — Résultante d'attraction magnétique pour une machine quadripolaire.

et :

$$F = F_2 - F_1$$

$$F = \frac{S}{\sqrt{2}\,8\pi}(\mathcal{B}^2_2 - \mathcal{B}^2_1)$$

comme :

$$\varphi_1 = \frac{S}{2}\mathcal{B}_1 = \frac{\mathcal{F}}{2\mathcal{R}_t - \frac{2\mathcal{E}}{\frac{S}{2}} + \frac{2\mathcal{E}_1}{\frac{2}{S}}}$$

ou

$$S\mathcal{B}_1 = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_t + 2\left(\frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}}{S}\right)}$$

On trouve finalement :

$$F = \frac{4}{\sqrt{2}} \frac{\mathcal{B}^2 S x}{8\pi\alpha\mathcal{E}} \text{ dynes}$$

$$F = 2{,}8 \frac{\mathcal{B}^2 S x}{25 \times 10^6 \alpha \mathcal{E}} \text{ kgs} \qquad (3)$$

Comme on le voit, les formules (2) et (3) ne diffèrent entre elles que par les coefficients 2 et 2,8.

FORMULE GÉNÉRALE. — Elle sera :

$$F = A \frac{\mathcal{B}^2 S x}{25 \times 10^6 \alpha \mathcal{E}}$$

où :

F = résultante sur l'arbre des attractions magnétiques en kgs.
B = induction normale de l'entrefer en gauss.
S = surface polaire en cm².
x = décentrage en cm.
α = rapport de la réluctance totale du circuit magnétique normal (sans excentrage) à la réluctance du double de l'entrefer normal.
E = entrefer normal en cm.
A = C^te ayant les valeurs suivantes :

pour 4 pôles suivant le diamètre horizontal et le diamètre vertical: 2

4	pôles inclinés à 45°	2,8
6	—	6
8	—	9
12	—	15
16	—	20

Application. — Dynamo de 50 kw., 4 pôles à 45°.

$\mathcal{B} = 7.000$ gauss.
S = 950 cm².
$x = 0{,}5$ sensiblement.
$\alpha = 0{,}5$ sensiblement.
$\mathcal{E} = 0{,}5$

$$F = 2{,}8 \frac{7000^2 \times 950 \times 0{,}05}{25 \times 10^6 \times {}^1/_2 \times 0{,}5} = 260 \text{ kgs.}$$

Le poids de l'induit étant de 800 kgs, on voit que l'attraction magnétique représente les 32,5 % de ce poids, pour un excentrage de 1/10 de l'entrefer.

Effets de la résultante des attractions magnétiques

A. — Inducteurs fixes. — (Dynamos à courant continu). — La résultante est alors une force de direction constante comme la pesanteur; il en résulte simplement une fatigue supplémentaire pour l'arbre et les paliers, mais pas de vibrations.

La résultante étant en général due à une dissymétrie dans l'entrefer provenant de l'usure des coussinets, on veillera à ce que l'excentricité x ne dépasse jamais 1/10 de l'entrefer.

B. — Inducteurs tournants. — (Alternateurs). — 1° la résultante est due à une dissymétrie de l'entrefer.

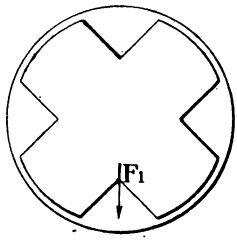


Fig. 136.

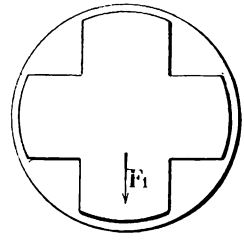


Fig. 137.

Résultante d'attraction magnétique dans un inducteur d'alternateur.

Supposons un inducteur à 4 pôles. Lorsque les pôles seront dans la position de la figure 136, la résultante, ainsi qu'on l'a vu, ayant pour valeur :

$$F_1 = 2\,\frac{\mathcal{B}^2 S\,x}{25 \times 10^6 \alpha \mathcal{E}}$$

et quand ils sont dans la position de la figure 137, on a :

$$F_2 = 2{,}8\,\frac{\mathcal{B}^2 S\,x}{25 \times 10^6 \alpha \mathcal{E}}$$

Ainsi la résultante subit des variations dans le rapport de 2/2,8.

Il en résulte :

1° Une force F_c constante en grandeur et en direction, égale à :

$$F_c = 2{,}4 \frac{\mathcal{B}^2 S x}{25 \times 10^6 \alpha \mathcal{E}}$$

et produisant comme dans le premier cas une fatigue supplémentaire sur l'arbre.

2° Une force F_a alternative, égale à :

$$F_a = 0{,}4 \frac{\mathcal{B}^2 S x}{25 \times 10^6 \alpha \mathcal{E}}$$

produisant des vibrations. Ces vibrations ne seront pas considérables, car cette force est relativement faible.

A mesure qu'on augmente le nombre des pôles, cette force allant en diminuant deviendra négligeable.

Ainsi dans le cas d'inducteurs tournants, une dissymétrie dans l'entrefer aura pour effet de produire une fatigue supplémentaire de l'arbre et dans le cas d'un petit nombre de pôles, des vibrations qui ne seront jamais très considérables.

2° **La résultante est due à un défaut dans un pôle.** — (Soufflure, court-circuit dans les spires d'une bobine). — La résultante, ayant alors une direction fixe par rapport à l'inducteur, tourne donc dans l'espace avec celui-ci. Il en résultera des vibrations, car si B_d représente l'induction du pôle défectueux, la force produisant les vibrations sera :

$$F = \left(\frac{\mathcal{B}^2 - \mathcal{B}^2_d}{2\pi} \right) S$$

force qui peut être assez considérable, car $\mathcal{B}_d$ peut être faible.

Fixation des noyaux polaires à la jante et à la roue polaire

Les noyaux polaires sont :

Ou venus de fonte avec la roue polaire,

Ou indépendants de celle-ci et fixés sur elle, au moyen de boulons ou de clavettes.

Les noyaux polaires venus de fonte avec la roue polaire correspondent à une construction plus simple et plus économique, mais ils ont l'inconvénient de rendre le remplacement des bobines inductrices beaucoup plus difficile, car il faut pour cela enlever l'induit.

Lorsque la force centrifuge est très considérable, les noyaux venus de fonte sont seuls admissibles, car autrement il faudrait

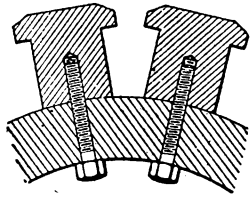


Fig. 138. — Noyaux massifs. Mode de fixation par boulons

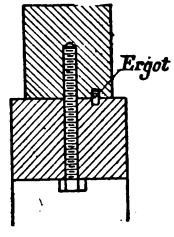


Fig. 139. — Fixation des noyaux polaires par boulons.

donner aux boulons fixant les noyaux sur la jante des sections beaucoup trop fortes.

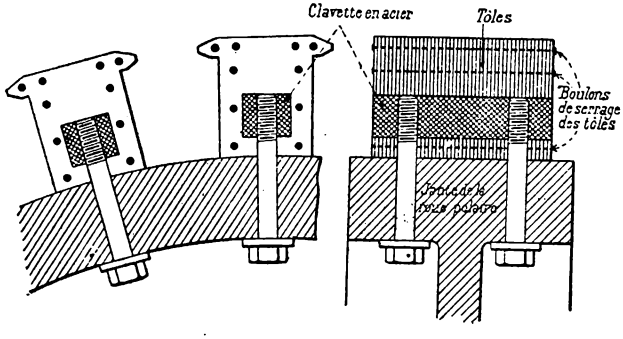


Fig. 140. — Noyaux feuilletés. — Fixation par boulons et pièce d'acier auxiliaire.

La fixation sur la jante des noyaux indépendants de la roue polaire peut se faire de plusieurs manières différentes. Les figures 138 à 145 indiquent les principales.

Dans le cas de la figure 138, le noyau polaire est maintenu par un ou deux boulons, selon l'importance de la force centrifuge.

Lorsqu'il n'y a qu'un seul boulon, pour empêcher le noyau polaire de tourner, on le munit d'un ergot vissé dans les pôles et entrant dans la jante (fig. 139).

Dans la figure 140, les noyaux polaires feuilletés sont traversés par une barre d'acier massive, dans laquelle sont vissés les boulons.

La figure 141 s'interprète d'elle-même.

Les figures 142 et 143 montrent un mode de fixation de noyaux

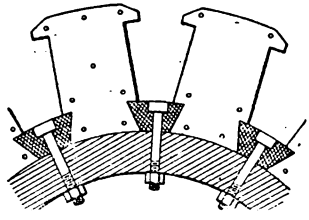


Fig. 141. — Noyaux feuilletés. Fixation par règles et boulons.

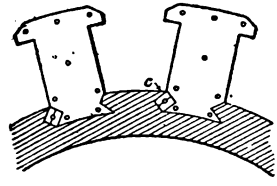


Fig. 142. — Noyaux feuilletés. Fixation par clavettes.

polaires au moyen de deux clavettes enfoncées en sens inverse l'une de l'autre.

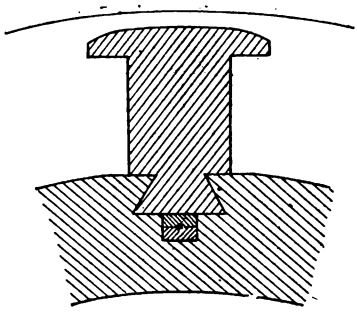


Fig. 143. — Noyau polaire fixé par deux clavettes.

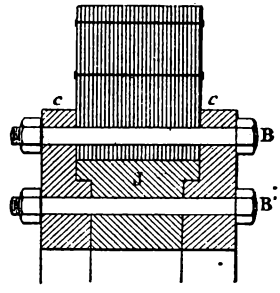


Fig. 144. — Noyaux feuilletés. Fixation par couronnes et boulons.

Dans le petit trou qui est représenté entre les deux clavettes, on engage un fil de fer que l'on tord à chaque extrémité pour empêcher les clavettes de se desserrer.

Enfin, dans la figure 144, les tôles des noyaux polaires sont serrées entre deux couronnes C au moyen de boulons B, les deux couronnes étant maintenues à la jante par les boulons B'. Bien que l'on puisse admettre que les tôles fortement serrées par les rivets forment un seul bloc, il est prudent de calculer les boulons B non au cisaillement, mais à la flexion, comme une poutre encastrée aux deux extrémités avec la charge uniformément répartie.

Les dispositions les plus employées sont celles des figures 138, 140, 142 et 143.

Lorsque les noyaux polaires, qui sont toujours en acier, sont fixés sur une jante en fonte, par exemple dans le cas d'un alternateur volant, il faut interposer entre les noyaux et la jante une plaque d'acier doux P, ayant pour rôle d'épanouir les lignes de force, afin que l'induction à l'entrée dans la fonte ne soit pas trop considérable, ce qui créerait une forte réluctance (fig. 145).

On peut également, dans le même but, encastrer légèrement les noyaux dans la jante, de façon à réaliser une disposition analogue à celles des figures 141, 142 et 143.

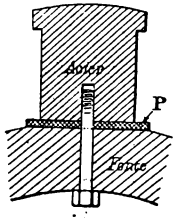


Fig. 145. — Noyaux massifs d'acier. Montage sur jante en fonte.

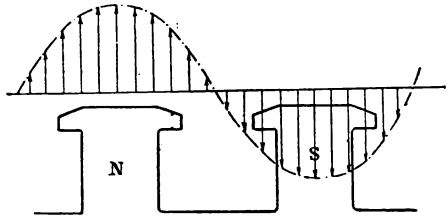


Fig. 146. — Courbe d'induction dans l'entrefer.

PIÈCES POLAIRES OU ÉPANOUISSEMENTS POLAIRES

Ainsi qu'on l'a déjà dit, les noyaux polaires se terminent du côté de l'induit en s'épanouissant, de façon que dans l'entrefer *les projections des lignes de force perpendiculairement aux conducteurs de l'induit* donnent une courbe autant que possible sinusoïdale (fig. 146).

C'est afin de pouvoir réaliser cette condition que les constructeurs ont imposé aux pièces polaires, d'après des données plus ou moins empiriques, des formes très variées.

Les plus employées sont celles indiquées figures 147, 148, 149 et 150.

Dans la figure 147, les pièces polaires ont été tournées à un diamètre inférieur à celui de l'induit, de façon que le flux, au lieu de pénétrer perpendiculairement à la surface de l'induit, fasse au contraire un certain angle avec cette surface, de telle sorte que les composantes radiales x' des lignes de force puissent former une sinusoïde, comme on l'a indiqué précédemment.

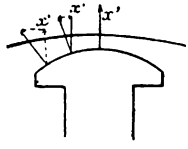


Fig. 147. — Pièces polaires à rayon inférieur à celui de l'induit.

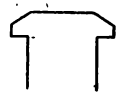


Fig. 148. — Pièces polaires avec extrémités abattues.

Dans la figure 148, on a abattu les côtés des pièces polaires pour obtenir le même résultat.

Dans la figure 149, les pièces polaires sont formées de plusieurs parties légèrement décalées les unes par rapport aux autres.

Parfois, pour obtenir le même effet, on incline toutes les pièces

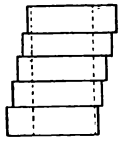


Fig. 149. — Pièces polaires à sections décalées.

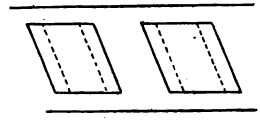


Fig. 150. — Pièces polaires inclinées par rapport aux conducteurs de l'induit

polaires par rapport à la direction des conducteurs de l'induit, c'est-à-dire par rapport à la direction de l'arbre, comme l'indique la figure 150 où l'on suppose l'inducteur vu en plan.

On pourrait également, et on l'a d'ailleurs fait, incliner les encoches de l'induit au lieu des noyaux polaires.

Fixation des pièces polaires sur les noyaux polaires. — Les pièces polaires sont venues de fonte avec les noyaux, sauf :

1° Lorsqu'elles doivent être feuilletées, les noyaux devant être massifs;

2° Lorsque, les noyaux étant venus de fonte avec la roue polaire, elles doivent pouvoir être enlevées facilement pour permettre la mise en place et le remplacement des bobines inductrices.

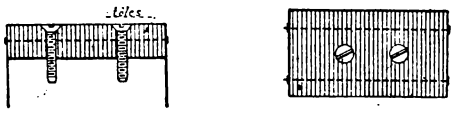


Fig. 151.
Fixation par vis des pièces polaires aux noyaux

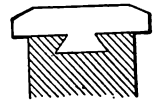


Fig. 152. — Fixation par taille en queue d'aronde des pièces polaires aux noyaux.

Les pièces polaires (feuilletées ou non) sont alors le plus souvent fixées aux noyaux polaires par une ou plusieurs vis (fig. 151).

Lorsque les pièces polaires doivent être feuilletées et fixées sur des noyaux massifs, pouvant être séparés de la roue polaire, on les taille souvent en queue d'aronde, et on les fixe aux noyaux polaires au moment de la coulée de ceux-ci (fig. 152).

Écartement des noyaux polaires. — L'écartement des noyaux polaires a, comme la forme des épanouissements polaires, une très

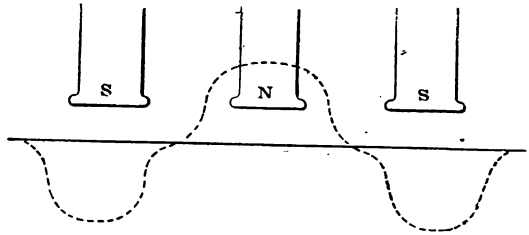


Fig. 153. — Influence de l'écartement des noyaux sur la f. é. m.
Noyaux trop rapprochés. Courbe pointue.

grande importance sur la courbe de la force électromotrice induite.

Dans la figure 153, les pôles étant trop rapprochés, la variation

de flux se fait trop rapidement, et l'on a une courbe de force électromotrice très pointue.

Dans la figure 154, la variation de flux est trop lente, la courbe de force électromotrice est alors aplatie.

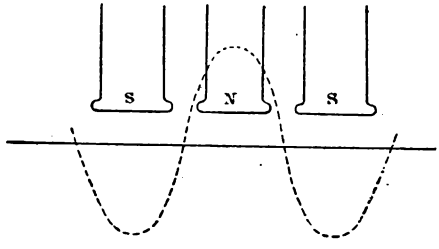


Fig. 154. — Influence de l'écartement des noyaux sur la f. é. m.
Noyaux trop écartés. Courbe aplatie.

Pour réaliser une bonne courbe de la force électromotrice induite, il faut adopter (fig. 155) :

Pour les alternateurs hétéropolaires :

$$\frac{b}{a} = \frac{1}{2}$$

et pour les alternateurs homopolaires :

$$\frac{b}{a} = 2.$$

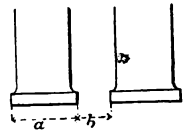


Fig. 155. — Dispositions à adopter pour les noyaux polaires pour avoir une f. é. m. sinusoïdale.

BOBINES INDUCTRICES

Les bobines inductrices, qui sont placées sur les noyaux polaires, sont toujours montées en série.

Il serait, en effet, dangereux de former pour l'inducteur plusieurs circuits en parallèle (fig. 156), car si l'un des circuits venait à être interrompu, il se formerait des dissymétries très importantes dans les attractions magnétiques, et il pourrait en résulter de graves accidents.

Si, par exemple, l'inducteur était formé de deux circuits en parallèle, et si l'un d'eux venait à être coupé, l'attraction magnétique F due aux pôles N_1S_1 existerait seule. Comme cette attraction tourne

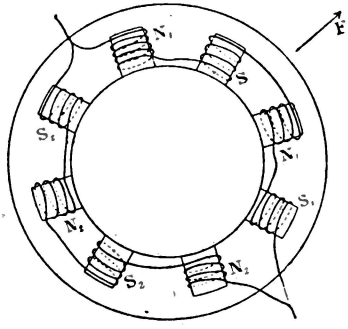


Fig. 156. — Montage vicieux (en parallèle) des circuits inducteurs.

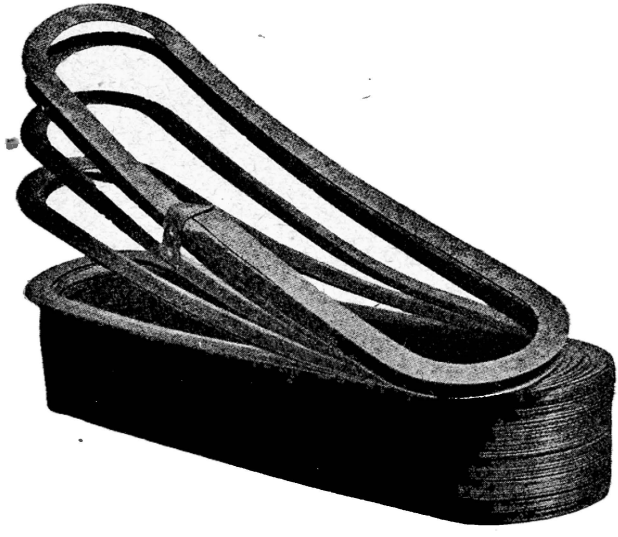


Fig. 157. — Ruban de cuivre enroulé sur champ pour former une bobine inductrice.

avec l'inducteur, et qu'elle est très considérable, pouvant *dépasser de beaucoup* le poids de l'inducteur, il se produirait de très fortes vibrations fatiguant la machine, pouvant arracher les chapeaux

des paliers et mettre l'inducteur en contact avec l'induit. Si cependant on est obligé d'avoir deux circuits en parallèle, il faut que l'un des circuits produise tous les pôles nord et l'autre tous les pôles sud.

Les bobines inductrices sont faites, ou avec du fil rond isolé par une ou deux couches de coton, ou avec du ruban de cuivre nu *enroulé sur champ* et isolé par du coton, du papier ou du presspahn (fig. 157).

Les bobines faites avec un ruban de cuivre ont été imaginées par la Maison Brown-Boveri en 1893. Elles sont de beaucoup les plus avantageuses, car :

1° On n'a pas à craindre avec elles de courts-circuits intérieurs comme avec les bobines faites avec du fil rond.

Le fil rond, en effet, sous l'influence des vibrations, de la force centrifuge et de l'échauffement, peut subir de légers déplacements qui, à la longue, usent l'isolant et déterminent des courts-circuits;

2° La place est mieux utilisée, car on n'a pas avec le ruban les vides qui se trouvent forcément entre les fils;

3° Le refroidissement de l'inducteur est meilleur, d'abord parce que, ainsi qu'on vient de le dire, les bobines sont plus compactes, et ensuite parce que, à la surface extérieure, le cuivre n'est le plus souvent pas isolé, d'où un meilleur rayonnement de la chaleur.

L'emploi du ruban de cuivre n'est pas toujours possible. Il faut pour cela que la section adoptée pour le conducteur inducteur soit suffisamment grande, c'est-à-dire que l'intensité soit assez considérable, ce qui nécessite, en général, aux bornes de l'inducteur une tension assez réduite (40 à 80 volts).

Une aussi basse tension n'est pas toujours commode à utiliser; aussi emploie-t-on parfois le fil rond. Il est indispensable dans ce cas, en faisant la bobine, de *tendre suffisamment le fil pour qu'il ne puisse pas jouer,* et d'employer de préférence du fil isolé avec deux couches de coton.

Pour essayer l'isolement entre spires, on peut faire passer un courant alternatif dans la bobine. A cause de la self-induction, on peut obtenir avec le courant alternatif, pour la même intensité, des tensions entre spires beaucoup plus grandes que dans le cas du continu et d'autant plus considérables que la fréquence sera plus élevée.

Les conducteurs sont enroulés au tour, sur des bobines métalliques avec joues épaisses et bien conductrices, jouant le rôle d'amortisseur et d'étouffeur d'harmoniques.

Amortisseurs Leblanc. — Pour amortir les oscillations pendulaires dans le cas du couplage en parallèle, on emploie souvent un dispositif imaginé par M. Maurice Leblanc, consistant à percer des trous dans les pièces polaires, et à placer dans ces trous des barres de cuivre qui sont soudées ensemble, à chacune de leurs extrémités, à un cercle de cuivre (fig. 158).

Les courants de Foucault, qui prennent naissance dans cette « cage d'écureuil », amortissent fortement les oscillations pendulaires.

Ces amortisseurs sont très employés. Dans le cas des alternateurs

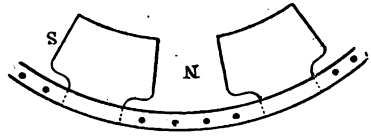


Fig. 158. — Amortisseurs d'oscillations Leblanc.

commandés par turbines hydrauliques, on se contente de placer, comme amortisseurs, des joues massives servant en même temps

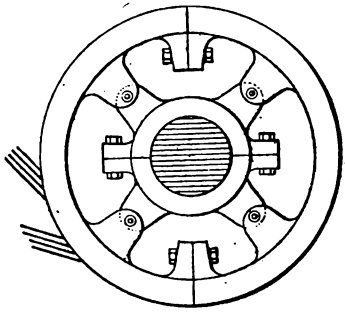


Fig. 159. — Bagues d'amenée du courant à l'inducteur.

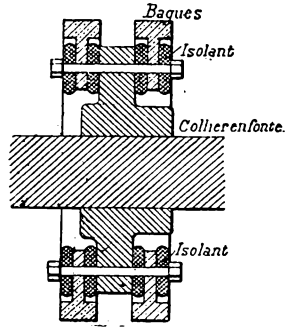


Fig. 160. — Fixation sur l'arbre des bagues (bronze).

à maintenir les bobines inductrices. Les pôles massifs forment d'ailleurs souvent des amortisseurs suffisants.

Bagues amenant le courant à l'inducteur. — Les bagues servant à amener le courant à l'inducteur sont ordinairement en cuivre (ou plutôt en bronze) et quelquefois en acier.

Les bagues en cuivre ou en bronze sont faciles à remplacer une fois usées; les bagues en acier sont plus économiques comme construction, mais plus difficilement remplaçables car elles sont placées comme des frettes.

On peut évidemment fixer les bagues sur l'arbre de bien des manières.

Les figures 159, 160 et 161 indiquent deux dispositions assez en faveur, dans le cas des bagues en bronze.

Les bagues en acier, assez employées actuellement, sont fixées à chaud sur l'arbre comme des frettes.

Entre l'arbre et la bague, on interpose une couronne de micanite (fig. 162).

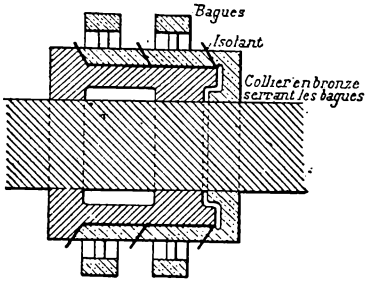


Fig. 161.
Fixation sur l'arbre des bagues (bronze).

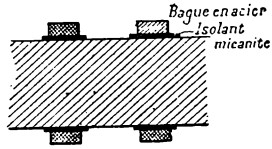


Fig. 162. — Montage sur l'arbre de bagues en acier.

Les bagues doivent être parfaitement tournées et ne pas présenter le moindre faux rond.

Les balais sont ordinairement en charbon, car les balais métalliques usent et rayent les bagues plus facilement.

Il faut toujours placer plusieurs balais pour chaque bague, car, après quelque temps de fonctionnement, les bagues sont usées plus ou moins inégalement et en certains points les contacts peuvent être mauvais; il en résulterait des étincelles assez fortes, s'il n'y avait pas d'autres balais pour assurer le passage du courant.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DES DIFFÉRENTS TYPES D'ALTERNATEURS MODERNES

ALTERNATEURS SPÉCIAUX

Nous avons vu précédemment comment on pouvait classer les alternateurs modernes (voir page 29).

Dans l'étude que nous allons faire, nous passerons rapidement en revue les principales dispositions adoptées suivant les cas.

Alternateurs à faible vitesse angulaire ou alternateurs volants

La vitesse de ces alternateurs est en général comprise entre 150 et 60 tours par minute. Elle peut être parfois beaucoup plus faible. Ainsi la Maison Brown-Boveri a construit, pour la centrale d'Olten-Aarburg, des alternateurs à axes verticaux commandés directement par turbines tournant seulement à 28 tours par minute.

Comme on l'a vu, l'alternateur sera d'autant plus lourd, et par suite plus coûteux, que sa vitesse angulaire sera plus faible. On doit donc, autant que possible, chercher à augmenter celle-ci.

Ces alternateurs à vitesse lente sont en général commandés par des machines à vapeur à piston ou des moteurs à gaz, donnant un couple très variable pendant un tour.

Il faut alors, surtout si l'on a à coupler en parallèle plusieurs alternateurs, mettre un volant suffisant pour que les variations de la vitesse angulaire ne soient pas trop fortes.

Le moment d'inertie de ce volant doit être évidemment d'autant plus grand que la vitesse angulaire moyenne sera plus faible.

Dans l'industrie, au lieu de faire intervenir le moment d'inertie proprement dit :

$$K = \Sigma m r^2,$$

on considère souvent ce qu'on appelle le PD^2 du volant, c'est-à-dire le produit du poids du volant par le carré du diamètre de gyration.

On a évidemment :

$$PD^2 = 4\,gK,$$

g représentant l'accélération due à la pesanteur.

On peut, en effet, écrire :

$$K = M\left[\frac{D}{2}\right]^2$$

et

$$P = Mg.$$

On peut, comme on l'a fait souvent autrefois, mettre un volant indépendant de l'alternateur.

Actuellement, on préfère constituer le volant par l'inducteur lui-même, comme l'a fait la première fois en 1893 la Maison Brown-Boveri pour un alternateur de 600 chevaux tournant à 120 tours. On a, dans ce cas, un ensemble moins encombrant, une construction plus économique, et les effets de torsion assez consisérables qui se produisent entre le volant et l'alternateur, lorsque ceux-ci sont indépendants l'un de l'autre, ne sont pas à craindre.

Les alternateurs à vitesse lente doivent avoir un grand diamètre pour posséder un grand moment d'inertie.

L'inducteur, qui est plus massif que l'induit, convient parfaitement pour jouer le rôle de volant. On lui donne un diamètre aussi grand que le permet la force centrifuge, car, pour obtenir un moment d'inertie déterminé, il faudra évidemment un poids d'autant plus faible que le diamètre de gyration sera plus grand.

Comme on l'a vu au début de cet ouvrage, si l'on considère l'utilisation des matériaux (matière active et matière de soutènement) *au point de vue électrique seulement,* on aurait intérêt au contraire à diminuer le diamètre et à augmenter la largeur.

Un grand diamètre est aussi parfois nécessaire pour pouvoir placer convenablement tous les pôles inducteurs, qui sont très nombreux, par suite de la faiblesse de la vitesse angulaire.

La grandeur du diamètre n'est en général limitée que par la condition que la force centrifuge ne soit pas exagérée.

La vitesse tangentielle est, dans ce cas, comprise entre 20 et 40 mètres par seconde suivant que la roue polaire est en fonte ou en acier.

Alternateurs volants avec inducteurs tournants extérieurs à l'induit. — On vient de voir que, pour obtenir un moment d'inertie déterminé avec un minimum de poids, il fallait donner à l'inducteur un diamètre aussi grand que possible. D'autre part, au point de vue électrique, on a vu que, pour réduire les matériaux de soutènement, l'on avait intérêt à diminuer le diamètre, quitte à augmenter la largeur de la machine. Pour concilier ces deux conditions opposées, on emploie assez souvent actuellement pour les puissances moyennes, surtout avec les moteurs à gaz, des alternateurs dans lesquels l'inducteur entoure l'induit.

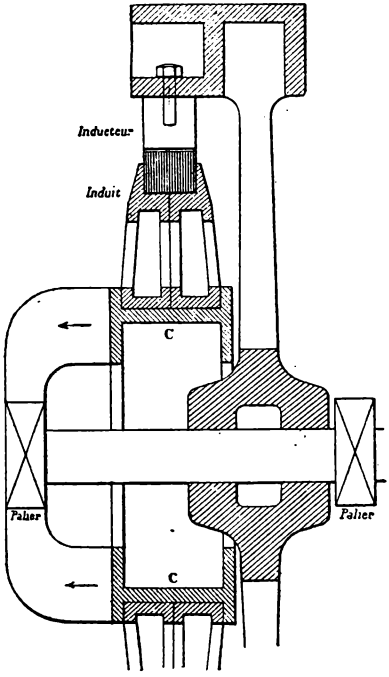


Fig. 163. — Alternateur Brown-Boveri (1900) avec inducteur extérieur à l'induit.

La figure 163, qui représente schématiquement l'alternateur Brown-Boveri de 350 chevaux qui figurait à l'Exposition de 1900, indique le principe de cette disposition brevetée par la Maison Brown-Boveri en 1894.

L'attraction magnétique s'exerce dans ce cas en sens inverse de la force centrifuge, c'est là un avantage.

L'inconvénient de ce type de machine réside surtout dans les difficultés que l'on rencontre pour fixer l'induit et permettre son dégagement facile de l'inducteur, en cas de réparations.

Dans l'alternateur Brown-Boveri de la figure 163, l'induit pouvait être dégagé de l'inducteur de la façon suivante : l'induit, qui était en deux parties, était placé sur un cylindre de fonte C également en deux parties. La moitié inférieure du cylindre C était fixée au palier et servait ainsi à supporter tout l'induit; la moitié supérieure pouvait être déplacée parallèlement à l'arbre dans le sens des flèches, de façon à recouvrir le palier.

L'induit pouvant tourner facilement autour du cylindre C, pour sortir la moitié de l'induit sur laquelle on devait faire une réparation, on amenait celle-ci sur le demi-cylindre C supérieur, et l'on déplaçait celui-ci parallèlement à l'arbre.

On peut également citer, comme alternateur à inducteur tournant extérieur à l'induit, les alternateurs diphasés de 5.000 chevaux de l'usine du Niagara. Ces machines seront décrites rapidement lorsque nous étudierons les alternateurs à arbre vertical.

Carcasse de l'induit dans le cas des alternateurs volants. — C'est surtout dans le cas des alternateurs volants que la carcasse doit présenter une très grande rigidité, car la plus légère déformation due au poids, ou aux attractions magnétiques, qui sont considérables, a pour effet de créer des dissymétries très importantes dans l'entrefer dont la valeur est très faible (1 centimètre environ) devant le diamètre intérieur de l'induit, qui parfois dépasse 7 mètres.

Ces dissymétries dans l'entrefer ont pour effet de déséquilibrer les attractions magnétiques, et par suite d'augmenter le fléchissement de la carcasse.

Emploi de tirants en fer pour donner de la rigidité à la carcasse. — On fixe sur les deux côtés de la carcasse des tirants en fer forgé aboutissant de chaque côté à un collier en fer concentrique à l'arbre. Ces tirants, dont la tension peut être réglée au moyen d'écrous, facilitent le centrage de l'induit et permettent de donner à la carcasse une grande rigidité et en même temps une appréciable légèreté (fig. 164).

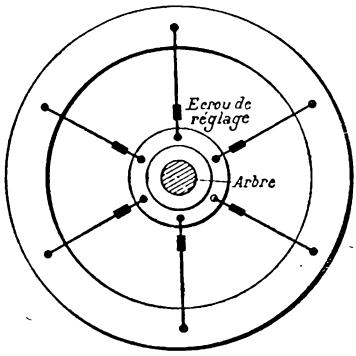


Fig. 164. — Emploi de tirants en fer pour augmenter la rigidité de la carcasse.

Ce dispositif a été employé surtout par l'ancienne Maison Schuckert de Nuremberg, par la Compagnie Générale Electrique de Nancy (alternateur de l'Exposition de 1900), etc...

Centrage de l'induit. — Dans les alternateurs volants, l'induit doit être centré par rapport à l'inducteur dont la position est bien déterminée par le montage de l'arbre de la machine à vapeur.

Comme l'induit a un poids considérable, et que, d'autre part, le centrage doit être très précis, on emploie à cet effet de véritables vis calantes qui permettent facilement de déplacer l'induit, soit verticalement, soit latéralement.

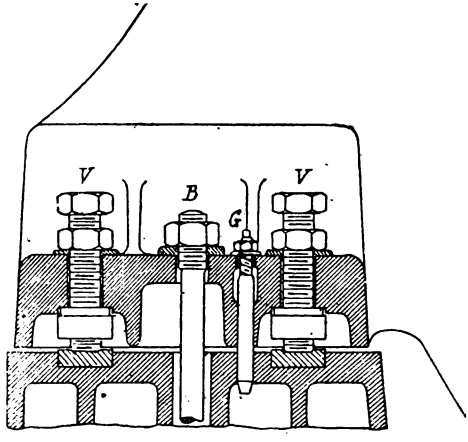


Fig. 165. — Montage de la carcasse de l'induit sur la plaque de fondation. V, vis permettant de déplacer la carcasse verticalement. G, goupille de centrage.

Les figures 165 et 166 indiquent d'une façon schématique comment on peut centrer l'induit.

Les boulons V faisant fonction de vis calantes permettent les déplacements verticaux et les boulons H les déplacements horizontaux.

Très souvent, les boulons V et H se trouvent réunis sur la même machine. Parfois cependant il n'existe que des vis calantes comme dans le cas de la figure 165. On place alors les goupilles G servant de repère pour fixer exactement la position de l'induit. Au montage, on déplace l'induit jusqu'à ce que l'on puisse enfoncer facilement les goupilles. L'écrou qui se trouve à la tête de la goupille permet de sortir celle-ci facilement. Dans d'autres machines, les vis calantes V font défaut et il n'existe que les vis H (fig. 166). Le centrage de

l'induit en hauteur est obtenu dans ce cas en plaçant des tôles sous la carcasse (fig. 143).

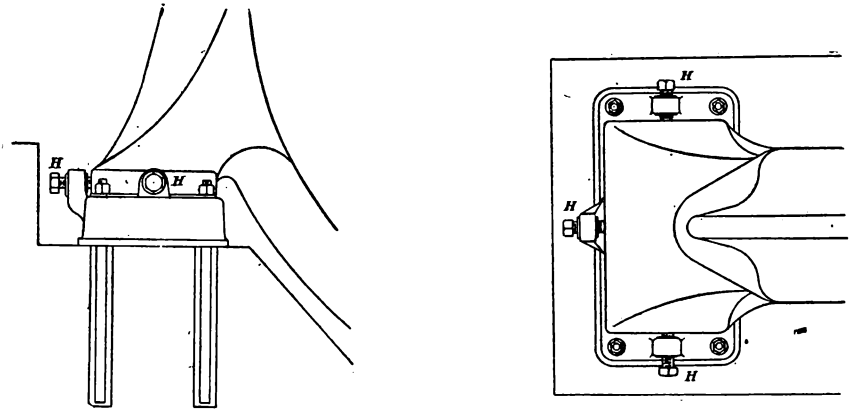


Fig. 166. — Montage de la carcasse de l'induit sur la plaque de fondation. H, vis permettant de déplacer la carcasse dans un plan horizontal.

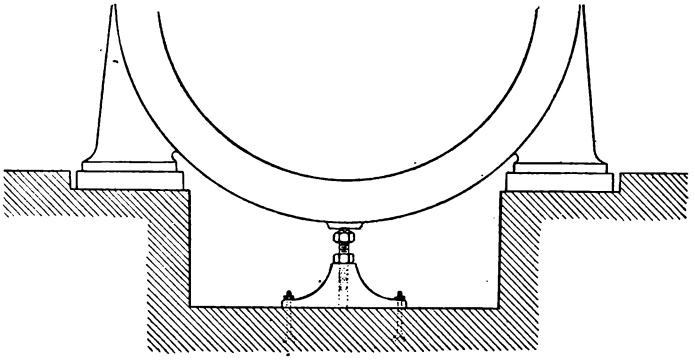


Fig. 167. — Vérin permettant de déplacer la carcasse verticalement.

Une fois l'induit centré, il est fixé solidement au moyen de boulons sur les plaques de fondation, qui sont scellées dans un massif de maçonnerie.

La partie inférieure de l'induit est souvent supportée par un ou plusieurs vérins (fig. 167) ou par un dispositif jouant le même rôle,

comme celui de la figure 168 qui a été employé par la Société l'Eclairage Electrique, et qui permet de déplacer l'alternateur non

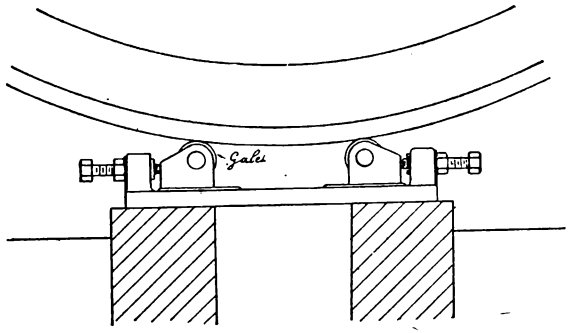


Fig. 168. — Dispositif servant à déplacer la carcasse verticalement et latéralement.

seulement en hauteur, mais aussi latéralement.

Alternateurs à grande vitesse angulaire. Turbo-alternateurs.

Avant 1900-1901, la construction industrielle des alternateurs commandés directement par des turbines à vapeur n'existait pour ainsi dire pas.

Entre 1900 et 1905, la construction de ces machines n'a été entreprise que par un très petit nombre d'ateliers dont les plus importants étaient, sur le continent, ceux d'Oerlikon et ceux de MM. Brown-Boveri. Depuis 1905 surtout, la construction des turbo-alternateurs a pris une extension considérable, et, à l'heure actuelle, tous les grands ateliers de construction s'en préoccupent.

La construction des turbo-alternateurs présente de très grandes difficultés que l'on est arrivé à vaincre complètement.

Causes principales des difficultés rencontrées dans la construction des turbo-alternateurs. — 1° *Force centrifuge considérable due à la grande vitesse angulaire.* — Actuellement la vitesse angulaire des turbo-alternateurs varie de 3.000 tours par minute,

pour des puissances moyennes pouvant dépasser 8.000 kilowatts, à 750 tours pour les grandes puissances (30.000 kilowatts). La vitesse tangentielle peut alors atteindre des valeurs considérables, 80 à 100 mètres par seconde et même parfois plus de 110 mètres.

Pour ne pas avoir une force centrifuge exagérée, on est obligé de réduire le diamètre le plus possible, et d'augmenter en conséquence la largeur de la machine.

Cependant, le diamètre ne pouvant être réduit suffisamment, la force centrifuge reste considérable.

Ainsi, dans un turbo-alternateur tournant à 3.000 tours et ayant, pour l'inducteur, un diamètre de 60 centimètres, la force centrifuge est, par gramme-masse à la périphérie :

$$f_c = \frac{1\text{ gr.} \times \frac{60}{2} \times \left(2\pi \frac{3000}{60}\right)^2}{981} = 3.015 \text{ grammes.}$$

et la vitesse tangentielle :

$$V = \pi \times 0.60 \times \frac{3000}{60} = 94{,}2 \text{ mètres par seconde.}$$

Dans un alternateur volant de même puissance, mais tournant à 142 tours par minute, et possédant un diamètre d'inducteur de 310 centimètres, la force centrifuge par gramme-masse à la périphérie n'est que de :

$$f'_c = \frac{1\text{ gr.} \times \frac{310}{2} \times \left(2\pi \frac{142}{60}\right)^2}{981} = 35{,}889 \text{ grammes}$$

et la vitesse tangentielle :

$$V' = \pi \times 3.10 \times \frac{142}{60} = 23 \text{ mètres par seconde.}$$

Cette force centrifuge énorme oblige :

a) A n'employer que des matières très résistantes (bronzes et aciers spéciaux) et à donner à la partie tournante (rotor) les dispositions spéciales que l'on indiquera dans la suite;

b) A faire aussi parfait que possible les équilibrages *statique* et *dynamique* du rotor.

On vient de voir, en effet, que pour une machine tournant à 3.000 tours par minute et ayant un diamètre de 60 centimètres, la force centrifuge par gramme-masse à la périphérie était de 3.015 grammes.

En supposant à la périphérie une masse de 10 grammes seulement, non équilibrée, on aurait donc une force de 30 kilogrammes tournant avec le rotor, et déterminant de fortes vibrations pouvant fatiguer beaucoup la machine (fig. 169).

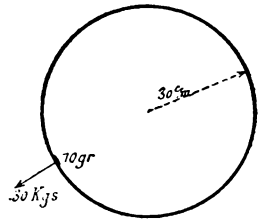


Fig. 169. — Naissance de forces tournantes importantes dans le cas de turbo-alternateurs non équilibrés.

Quelques constructeurs, la Société d'Electricité A. E. G. et la Maison Siemens, notamment, ont établi des locaux spéciaux, quelquefois souterrains, garnis de solides madriers pour pouvoir sans danger essayer les rotors à l'emballement.

2° *Surintensités considérables, mais de courte durée, au moment d'un court-circuit.* — Par suite d'un court-circuit, l'intensité dans l'induit pendant quelques périodes peut dépasser vingt fois et même trente fois l'intensité normale de la pleine charge de l'alternateur. Elle diminue ensuite rapidement et peut se maintenir au maximum entre trois et quatre fois l'intensité normale. Ces surintensités se produisent aussi fortes dans les turbo-alternateurs parce que la self-induction de l'induit est relativement très faible, tandis que la réaction d'induit est au contraire considérable.

On est obligé de fixer très solidement les conducteurs dans les encoches et surtout en dehors de celles-ci pour éviter que les forces électromagnétiques agissant sur ces conducteurs ne viennent à les tordre et à les briser. Ces forces, étant proportionnelles au carré de l'intensité, peuvent donc devenir jusqu'à *neuf cents fois* plus grandes que celles qui doivent agir normalement. Ces surintensités produisent d'autre part des surtensions dans l'enroulement inducteur qu'il faut isoler en conséquence.

Pour réduire ces surintensités, dangereuses non seulement pour les alternateurs, mais aussi pour l'appareillage, il faut augmenter la self-induction de l'induit, soit en plaçant des selfs en dehors de l'induit, soit en employant des encoches complètement fermées (voir page 72).

3° *Grande largeur de la machine rendant surtout difficile le ser-*

rage des tôles. — Le diamètre devant être réduit au minimum, à cause de la force centrifuge, la largeur de la machine peut devenir très grande, si on la compare surtout à celle des alternateurs volants.

La figure 170, donnée par M. le Professeur P. Janet dans une conférence faite à la Société française de physique et représentant à l'échelle les dimensions comparées des parties tournantes d'un alternateur volant et d'un turbo-alternateur de même puissance (2.000 kilowatts), de même tension (5.000 volts) et ayant respectivement les vitesses de 70 tours et 1.500 tours, montre l'augmentation de longueur considérable due à la réduction du diamètre.

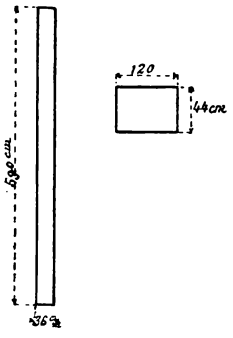


Fig. 170. — Dimensions comparées des parties tournantes d'un alternateur volant et d'un turbo-alternateur.

En raison de cette grande largeur, les tôles ne peuvent pas être comprimées suffisamment en une seule fois. On est obligé souvent, pour avoir un bon serrage, de les monter par paquets.

4° *Refroidissements très difficile, à cause de la réduction du volume de la machine et des surfaces de refroidissement.* — Il suffit de considérer la figure 170 pour voir que, la puissance étant la même, on a dans le cas du turbo-alternateur une grande réduction du volume de la machine, et, par suite, des surfaces de refroidissement.

Comme la puissance perdue par échauffement est la même sensiblement, il faut donc, pour éviter un échauffement exagéré, augmenter beaucoup la ventilation.

A cet effet, on ménage dans le rotor (inducteur) et dans le stator (induit) de nombreux canaux de ventilation parallèlement à l'arbre (fig. 171 et 172) et dans des plans perpendiculaires à celui-ci. Les canaux de ventilation parallèles à l'arbre sont relativement peu employés pour le stator.

Parfois, on dispose la carcasse de façon à déterminer un tirage naturel par échauffement de l'air à l'intérieur de la machine. Pour cela, la carcasse, qui a une forme cylindrique, est complètement fermée latéralement, mais possède deux grandes ouvertures aménagées, l'une à la partie supérieure, l'autre à la partie inférieure de cette carcasse (fig. 172).

En général le tirage naturel étant insuffisant, on fait circuler l'air dans la machine soit au moyen de ventilateurs indépendants, soit

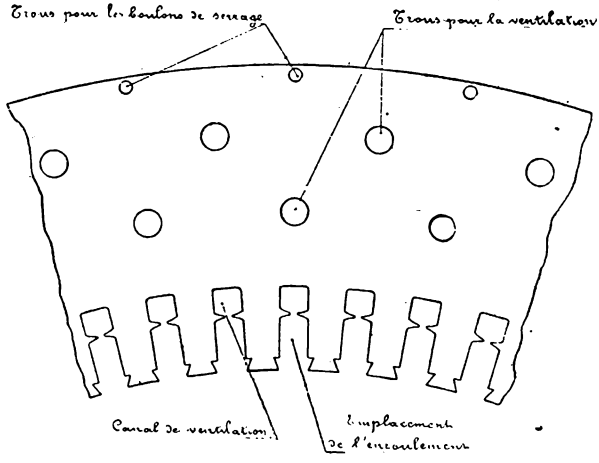


Fig. 171. — Tôle de stator de turbo-alternateur avec canaux de ventilation parallèles à l'arbre (turbo-alternateur Siemens).

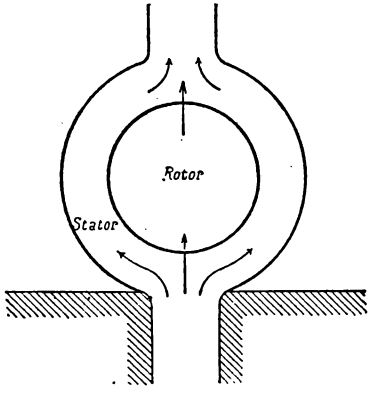


Fig. 172. — Disposition de la carcasse d'un turbo-alternateur pour création d'un tirage naturel.

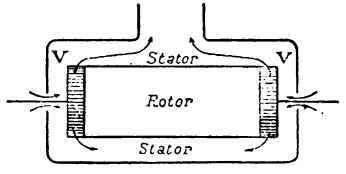


Fig. 173. — Refroidissement des turbo-alternateurs par ventilateurs auxiliaires.

presque toujours à l'aide du rotor qui est établi pour former un véritable ventilateur (fig. 173). Dans ce cas l'air qui est puisé à l'extérieur de la salle des machines passe d'abord dans le rotor en pénétrant de chaque côté de celui-ci, traverse ensuite le stator et s'échappe dans des caniveaux qui le conduisent à l'extérieur.

5° *Graissage et refroidissement des paliers devant être faits avec beaucoup de soins, à cause de la grande vitesse angulaire.* — En général, on emploie le graissage sous pression (l'huile étant envoyée dans les paliers au moyen d'une petite pompe actionnée par la turbine à vapeur) et le refroidissement des paliers par circulation d'eau.

Construction des turbo-alternateurs

L'induit, à part sa grande longueur, est semblable aux induits des alternateurs ordinaires.

L'inducteur, par contre, présente de très grandes différences.

On distingue actuellement :

Les inducteurs à pôles non saillants.

Les inducteurs à pôles saillants.

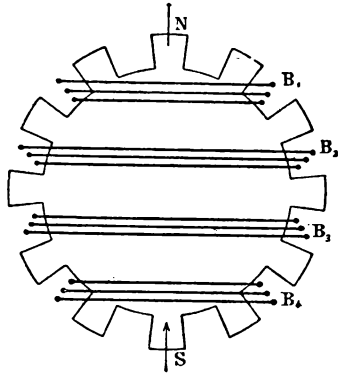


Fig. 174. — Inducteur bi-polaire de turbo-alternateur.

Inducteurs à pôles non saillants. — L'inducteur a, dans ce cas, la forme d'un induit denté de dynamo à courant continu avec des dents très larges et peu nombreuses.

Il est formé d'un cylindre en acier à la périphérie duquel on a ménagé de larges et profondes rainures.

Dans ces rainures sont placées des bobines, comme le montre la figure 174 qui représente un inducteur bipolaire.

L'ensemble des bobines forme un véritable solénoïde permettant de produire le flux SN.

La figure 175 représente un inducteur à 4 pôles. Comme on le voit, on laisse vides quelques encoches placées au milieu des bobines. Cette disposition a surtout pour but de rendre la courbe de l'induction dans l'entrefer plus voisine d'une sinusoïde.

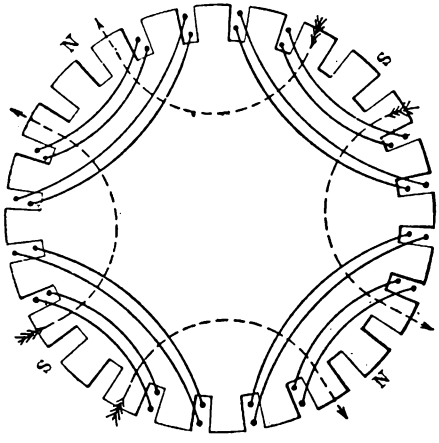


Fig. 175. — Inducteur quadripolaire de turbo-alternateur.

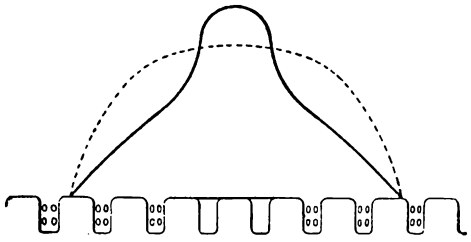


Fig. 176. — Amélioration de la force électromotrice par emploi d'un certain nombre d'encoches vides pour l'inducteur des turbo-alternateurs.

En effet, si l'on ne faisait pas d'encoches au milieu des bobines, le champ dans cette partie serait beaucoup trop intense, relativement à celui qui traverse les bobines, et l'on aurait pour représenter le champ inducteur la courbe de la figure 176 (courbe en trait plein), c'est-à-dire une courbe assez pointue, tandis qu'en augmentant la réluctance à l'intérieur des bobines par la présence des encoches, le champ dans cette région devient moins intense par

rapport à celui existant de chaque côté, et l'on peut obtenir une courbe voisine de la sinusoïde (courbe en trait pointillé).

Le cylindre d'acier qui forme le rotor est parfois constitué avec des tôles qui sont indispensables pour les alternateurs monophasés ou avec des disques de 1 à 2 centimètres d'épaisseur. Lorsque l'on emploie des tôles, il est prudent de bien s'assurer que celles-ci peuvent résister à la force centrifuge.

Actuellement, plusieurs constructeurs : MM. Schneider et C^ie^, MM. Brown-Boveri et C^ie^, la Maison Siemens, etc., trouvent qu'il est plus économique comme frais d'usinage et plus avantageux de faire

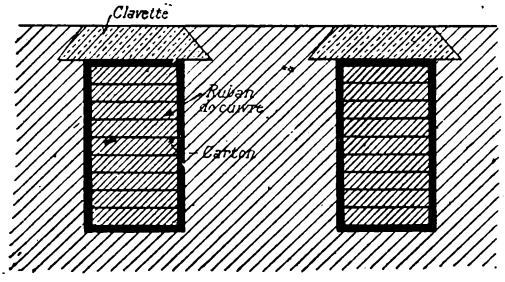


Fig. 177. — Fixation des conducteurs dans les encoches (Inducteur de turbo-alternateur).

le rotor avec un cylindre d'acier massif dans lequel on creuse les encoches pour l'enroulement et les ouvertures longitudinales et radiales servant à la ventilation.

Les bobines inductrices sont presque toujours formées avec du ruban de cuivre isolé par des bandes de carton presspahn.

On a ainsi des bobines absolument indéformables sous l'action de la force centrifuge, ce qui serait difficile à obtenir en employant du fil rond.

Les conducteurs sont maintenus dans les encoches par une clavette en bronze spécial ou en acier (fig. 177).

De chaque côté du cylindre, pour fixer solidement les parties des bobines qui sont en dehors des encoches, on place une calotte en un métal non magnétique, comme le bronze ou l'acier au nickel, qui vient coiffer complètement les bobines devenant alors invisibles.

On trouvera à la fin de cet ouvrage plusieurs photographies représentant la construction des turbo-alternateurs.

Turbo-alternateurs de la Société d'Electricité A.E.G. — Les turbo-alternateurs de cette Société sont surtout remarquables par la construction originale de l'inducteur.

Les bobines inductrices sont d'abord constituées par du ruban de cuivre que l'on enroule à plat au moyen d'une machine. L'isolement entre conducteur est effectué ensuite avec du presspahn enduit d'un vernis spécial. Une

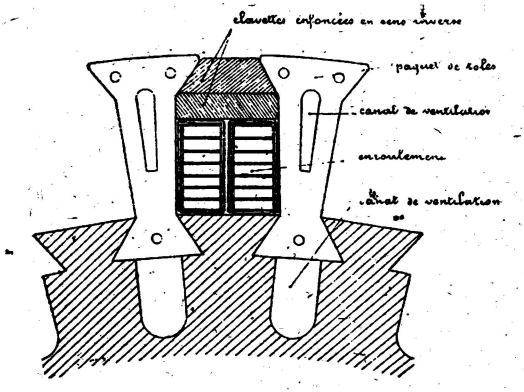


Fig. 178. — Coupe de l'inducteur des turbo-alternateurs de l'A. E. G.

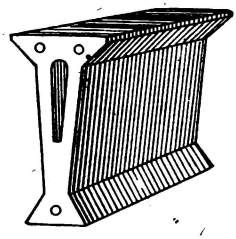


Fig. 179. — Paquet de tôles formant pièce polaire dans un turbo-alternateur de l'A. E. G.

fois isolées, les bobines sont cintrées et prennent leur forme définitive, puis elles sont soumises à la presse dans une étuve chauffée à la vapeur et où l'on fait le vide. Ainsi pressées très fortement à une température dépassant sensiblement celle qu'elles devront supporter en régime normal, les bobines prennent l'aspect de pièces massives, très rigides et indéformables. On les isole après à la main en collant du papier autour des faisceaux de conducteurs, puis, pour préserver cette isolation au papier, on l'entoure d'une feuille de laiton soudée.

On place ensuite les bobines ainsi établies directement sur l'arbre dont le diamètre est relativement grand, car il doit former lui-même le circuit magnétique de l'inducteur (fig. 178).

L'arbre est un cylindre en acier forgé dans lequel sont creusées des rainures qui servent de canaux de ventilation, et qui reçoivent à leurs extrémités taillées en queue d'aronde de véritables dents formées de tôles d'acier estampées, assemblées en paquets et rivées

à la presse. Ces paquets de tôles (fig. 179), qui ont comme longueur une dizaine de centimètres, et qui sont séparés entre eux par un espace de 1 centimètre environ par où s'échappe l'air circulant dans les canaux de ventilation, ne sont glissés dans les rainures de l'arbre qu'après la mise en place des bobines. Celles-ci n'ont donc pas besoin d'être déformées pour être placées dans l'inducteur, comme la plupart des autres constructeurs sont obligés de le faire.

Les bobines et les dents sont fixées solidement par des clavettes enfoncées à la presse hydraulique, par deux dans chaque encoche en sens inverse l'une de l'autre. Ces clavettes sont en bronze entre les pôles et en acier aux pôles.

Aux deux bouts du rotor les enroulements et les extrémités des clavettes sont maintenus, non par des calottes en bronze comme on le fait ordinairement, mais par des frettes formées d'une quinzaine de couches de fils soudés entre spires. La résistance mécanique du fil étant contrôlée pendant la fabrication de la frette par un dynamomètre, la Société d'Electricité A. E. G. estimait pouvoir obtenir ainsi une sécurité plus grande qu'en employant des calottes massives pouvant renfermer des points faibles.

Inducteurs à pôles saillants. — Ces inducteurs ressemblent davantage aux inducteurs ordinaires, comme on le constate par la figure 180 qui représente, vu en coupe par un plan perpendiculaire à l'arbre, un inducteur à quatre pôles de cette catégorie.

Dans les noyaux polaires, on a creusé des encoches pour placer les bobines inductrices qui sont ainsi maintenues très solidement.

Comme dans les inducteurs à pôles non saillants, les bobines inductrices sont faites avec du ruban de cuivre, elles sont maintenues dans les encoches par des clavettes en bronze et, de chaque côté, elles sont fixées par des calottes en bronze ou en acier.

On emploie pour former l'inducteur, soit des tôles, soit des disques (Société l'Eclairage Electrique), soit même un bloc d'acier dans lequel on taille des encoches. L'ancienne Société Lahmeyer notamment a construit de cette façon plusieurs turbo-alternateurs.

Les pôles saillants ont l'inconvénient de produire parfois un bruit désagréable à cause de l'air entraîné à grande vitesse par les pôles en saillie, aussi paraît-on employer actuellement de préférence les pôles non saillants.

Les inducteurs à pôles non saillants sont adoptés principalement par MM. Brown-Boveri, les ateliers d'Oerlikon, MM. Schneider et C^ie^, la Société Alsacienne de Constructions Mécaniques, la Société d'Electricité A. E. G., etc.

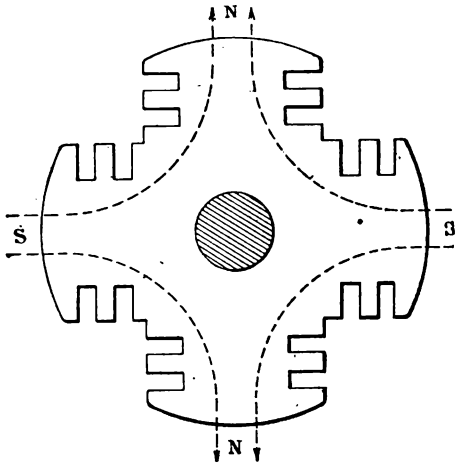


Fig. 180. — Inducteur de turbo-alternateur à pôles saillants.

Les inducteurs à pôles saillants ont été utilisés par la Société l'Eclairage Electrique, les anciennes Sociétés Lahmeyer et Alioth, etc.

Construction des Alternateurs suivant leur destination

(Electrochimie ou transport d'énergie et d'éclairage)

Les alternateurs destinés à l'électrochimie sont en général à basse tension, grande intensité, et doivent posséder une chute de tension assez grande, afin que l'intensité soit limitée quand un court-circuit se produit dans un four.

Si les alternateurs qui doivent alimenter des fours monophasés sont polyphasés, comme des dissymétries importantes peuvent se produire dans les intensités débitées par chaque phase, il est pru-

dent d'adopter, dans tous les cas, des pôles inducteurs feuilletés et pour le triphasé de monter en triangle l'enroulement induit.

Comme on l'a déjà dit (voir page 100), il n'est pas prudent et même souvent peu avantageux de construire à très basse tension, pour l'alimentation directe des fours, les alternateurs dont la puissance doit dépasser 600 à 800 kilovolt-ampères. Il est préférable d'établir les alternateurs à moyenne tension et d'ajouter des transformateurs abaisseurs que l'on peut d'ailleurs placer plus facilement très près des fours.

Les alternateurs qui doivent servir à l'éclairage et au transport d'énergie sont, le plus souvent, à haute ou moyenne tension, et doivent posséder une chute de tension beaucoup plus faible.

La valeur à admettre pour la chute de tension dans les alternateurs pour le transport d'énergie et l'éclairage est assez difficile à déterminer pour les raisons suivantes :

Avantages des alternateurs à faible chute de tension pour le transport de force et l'éclairage. — Les variations de tension dues aux variations de charge sont d'autant moins grandes sur un réseau que la chute de tension dans les alternateurs est plus faible.

Il résulte donc, d'une chute de tension relativement faible, les avantages suivants :

Un réglage plus facile de la tension par l'électricien de service au tableau;

Un éclairage plus régulier des lampes et une usure moins rapide de celles-ci;

Enfin le couple des moteurs asynchrones étant sensiblement proportionnel au carré de la tension, ceux-ci ont un couple plus constant, et risquent moins souvent de se décrocher ou d'absorber une intensité exagérée, par suite d'une baisse de tension un peu forte.

Il convient de remarquer que si les variations de charge ne sont pas trop brusques ni trop fortes par rapport à la puissance des alternateurs d'une centrale, *la chute de tension des alternateurs est bien moins nuisible que celle qui peut provenir des lignes et des transformateurs,* et que l'on peut très bien adopter sans inconvénient des alternateurs à grande chute de tension pour les distributions ordinaires d'énergie et d'éclairage. On a ainsi des machines qui supportent mieux les courts-circuits.

Inconvénients des alternateurs à faible chute de tension pour le transport de force et l'éclairage. — 1° S'il se produit un court-circuit en ligne, le courant tend à devenir d'autant plus intense que la chute de tension est plus faible; l'intensité peut, même pendant la durée de quelques périodes, devenir considérable au début du court-circuit si la self-induction partielle de l'induit est faible (c'est le cas des turbo-alternateurs, voir page 156);

2° La construction des alternateurs à faible chute de tension est plus coûteuse, car pour compenser la réaction de l'induit, il faut mettre beaucoup de cuivre sur l'inducteur.

Conclusions. — On peut donc conclure de ce qui précède que :

Lorsqu'on aura à alimenter un réseau dans lequel de fréquentes et brusques variations de charge ne seront pas à craindre, on aura avantage à employer des alternateurs ayant une chute de tension assez forte.

Dans le cas contraire, il faudra adopter de préférence des alternateurs à faible chute de tension avec des régulateurs de tension rapides si cela est nécessaire. Pour des variations de charge très fortes, très rapides et très fréquentes, les alternateurs compound Boucherot donneront de bons résultats.

Il sera nécessaire, avec les alternateurs à faible chute de tension, pour préserver les enroulements, de placer de bons disjoncteurs.

Construction des Alternateurs suivant la chute de tension à obtenir

La chute de tension dans un alternateur est due :

1° A la résistance ohmique de l'induit;

2° A la self-induction partielle de l'induit qui correspond au flux de fuite;

3° A la réaction de l'induit sur l'inducteur.

La chute de tension due à la résistance et même à la self-induction de l'induit (self qui, on l'a vu, peut être réduite en ouvrant les encoches) est relativement faible devant celle qui provient de la réaction de l'induit sur l'inducteur, surtout si le réseau a un faible facteur de puissance, ou cos φ. Le courant qui circule dans l'induit

produit, en effet, une force magnétomotrice qui tend à s'opposer d'autant plus énergiquement à celle de l'inducteur que le cos φ du réseau est plus petit.

Pour avoir une faible chute de tension, il faut donc que le nombre d'ampère-tours de l'inducteur soit très grand par rapport à celui de l'induit, de telle sorte que la force magnétomotrice de l'induit soit très faible devant celle de l'inducteur.

Comme le flux, qui passe dans l'induit, est fixé par la condition de produire une force électromotrice donnée avec une induction convenable et un nombre de conducteurs induits déterminé, il s'ensuit que, pour qu'il soit possible de faire produire par l'inducteur une grande force magnétomotrice, il faut que le circuit magnétique possède une grande réluctance.

Les alternateurs à faible chute de tension auront donc un grand entrefer et un inducteur saturé, le grand entrefer ayant pour but d'absorber l'excès de puissance de l'inducteur.

Pour les alternateurs à vitesse moyenne ou à vitesse lente, l'entrefer varie ordinairement de 0,5 à 1,5 centimètre. Pour les turbo-alternateurs qui, à cause de leur petit nombre de pôles, ont une réaction d'induit relativement considérable, l'entrefer peut atteindre 2 à 3 centimètres.

D'autre part, il faudra adopter dans l'induit une induction aussi grande que possible, afin d'augmenter le flux, et par suite diminuer le nombre de spires de l'induit.

Comme on le voit, l'inducteur devra avoir relativement beaucoup plus de cuivre que l'induit.

Il résulte de ces conditions :

1° *Un prix plus élevé de l'alternateur.* — A cause de la grande quantité de cuivre qu'il est nécessaire de placer sur l'inducteur pour produire une force magnétomotrice bien supérieure à celle de l'induit;

2° *De grandes difficultés dans le calcul de l'alternateur.* — Car l'inducteur étant saturé, il faut pouvoir déterminer exactement la valeur des fuites de l'inducteur, qui peuvent devenir très importantes et, surtout, connaître parfaitement la courbe de magnétisme du métal employé.

La saturation de l'inducteur rend en effet la réluctance de celui-ci assez forte devant la réluctance totale du circuit; une erreur dans

la détermination de cette réluctance peut donc avoir pour conséquence de rendre le flux et, par suite, la force électromotrice de l'alternateur, différents des valeurs que l'on cherchait à obtenir.

L'erreur serait d'autant plus grave que, par suite de la saturation de l'inducteur, une modification du flux, même légère, ne pourrait être réalisée qu'en faisant varier relativement beaucoup le courant d'excitation.

Comme, souvent, un même fournisseur livre des aciers ayant des courbes d'aimantation différentes, il n'est guère possible de faire les calculs sur des bases bien certaines. Pour éviter cet inconvénient, même si l'on n'a pas à craindre des courants de Foucault, on exécute

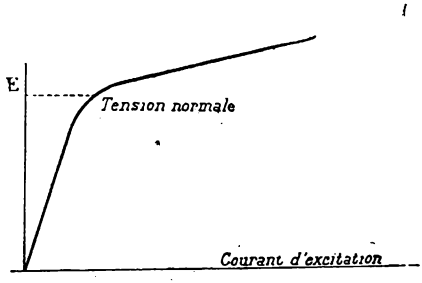


Fig. 181. — Alternateur à chute de tension moyenne. Caractéristique à vide. Fixation de la tension normale.

parfois avec des tôles les noyaux polaires, car on peut toujours, dans ce cas, déterminer exactement sur un échantillon la courbe d'aimantation pour une qualité de tôles déterminée.

En réalité, actuellement, on ne cherche que rarement à obtenir des chutes de tension très faibles, et les noyaux polaires ne sont jamais très saturés.

Le plus souvent, l'induction adoptée est telle que la tension normale de l'alternateur soit sensiblement au milieu du genou de la caractéristique à vide (courbe d'aimantation, fig. 181);

3° *L'impossibilité d'augmenter d'une façon notable la tension normale de l'alternateur.* — Il faudrait, en effet, pour cela, à cause de la saturation de l'inducteur, augmenter beaucoup le courant d'excitation, ce qui souvent n'est pas possible.

C'est là un inconvénient grave, car il arrive souvent qu'on est obligé de faire fonctionner un alternateur à une tension assez supé-

rieure à la tension normale pour pouvoir compenser un excès imprévu de chute de tension dans les lignes et les transformateurs.

Construction des Alternateurs suivant le nombre de phases

La construction ne diffère que par le nombre des bobines de l'induit et *par la nécessité de toujours feuilleter les pôles inducteurs dans le cas du monophasé.*

Comme on l'a vu, pour faire un alternateur *monophasé,* on choisit généralement un nombre d'encoches comme pour un alternateur triphasé (c'est-à-dire un nombre d'encoches par pôle divisibles par 3) afin de pouvoir plus tard transformer facilement, si cela est nécessaire, l'alternateur monophasé en alternateur triphasé, et pour pouvoir également utiliser les mêmes tôles.

Comme on l'a vu aussi, on n'utilise, dans ce cas, que les deux tiers des encoches et l'on n'a pas intérêt à en utiliser un plus grand nombre, comme le montre le raisonnement suivant (fig. 182).

Considérons en effet un alternateur triphasé. Chaque phase produit une force électromotrice *e* (tension simple en étoile).

Or, on a : OA = OB = OC.

L'alternateur monophasé utilisant les deux tiers des encoches donnera la tension E résultante de deux phases, c'est-à-dire numériquement égale à $e\sqrt{3}$ (tension composée).

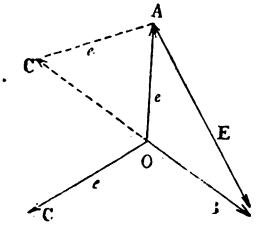


Fig. 182. — Prévision de la tension obtenue avec un alternateur triphasé transformé en monophasé.

Si l'on voulait faire un alternateur monophasé en utilisant toutes les encoches, il faudrait ajouter au vecteur AB le vecteur AC′ égal et parallèle à OC; la tension résultante serait alors C′B, égale évidemment à 2 *e*.

Ainsi, en utilisant les deux tiers des encoches, la force électromotrice et par suite la puissance sont proportionnels à 1,732 *e,* tandis que si l'on utilisait toutes les encoches, ces quantités seraient proportionnelles à 2 *e*.

La puissance aurait donc augmenté seulement de :

$$\frac{2 - 1{,}732}{1{,}732} = 15\ \%,$$

tandis que la résistance et le poids du cuivre induit auraient augmenté de 33 %.

Comparaison entre les alternateurs triphasés et monophasés au point de vue du poids, du prix et du rendement. — Pour le même inducteur et pour le même induit, réserve faite pour le nombre des bobines réduit aux deux tiers dans le cas du monophasé, la puissance que peut fournir un alternateur est égale à :

$3\ eI$ dans le cas du triphasé,

$\sqrt{3}\ eI$ dans le cas du monophasé,

si l'on admet la même densité de courant d'induit dans les deux cas.

Comme pour le monophasé les pertes totales par effet Joule sont plus petites, par suite de la non-utilisation d'un tiers des encoches, on peut admettre une densité de courant un peu plus grande. En réalité, pour les mêmes dimensions, un alternateur monophasé donne seulement 25 à 30 % moins de puissance qu'un alternateur triphasé.

On voit donc immédiatement qu'à puissances égales, un alternateur monophasé sera plus lourd, plus coûteux, et aura un rendement plus faible qu'un alternateur triphasé. D'autre part l'alternateur monophasé devra avoir ses pôles inducteurs toujours feuilletés, tandis que l'on pourra employer des pôles massifs avec un alternateur triphasé si les encoches sont en partie fermées.

ALTERNATEURS A ARBRE VERTICAL

Avec les chutes de faible hauteur, les turbines étant ordinairement, dans ce cas, à arbre vertical, pour conserver l'avantage de l'accouplement direct, on construit souvent les alternateurs avec l'arbre également vertical.

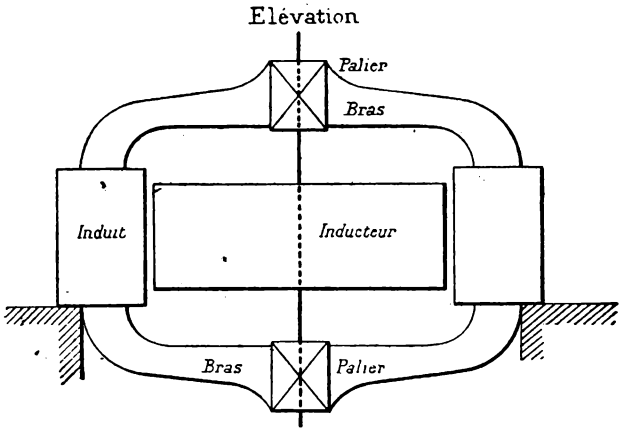


Fig. 183. — Alternateur à arbre vertical (type horizontal renversé). Coupe par un plan axial.

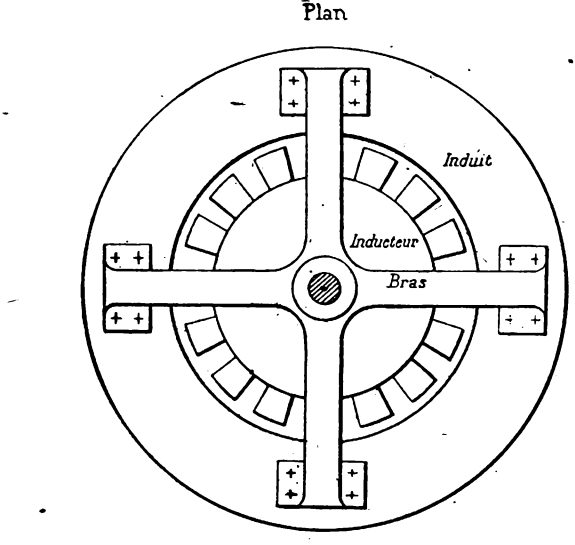


Fig. 184. — Alternateur à arbre vertical (type horizontal renversé). Vue en plan.

On peut distinguer trois catégories d'alternateurs à arbre vertical :

1° *Les alternateurs ayant la forme ordinaire des alternateurs à arbre horizontal.* — Dans les figures 183 et 184, qui représentent un alternateur de cette catégorie, chaque palier est relié à la carcasse de l'induit par quatre bras en fonte.

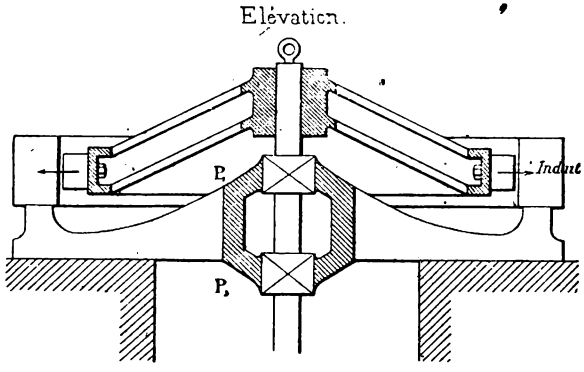


Fig. 185. — Alternateur vertical « à parapluie » Brown-Boveri. Coupe par un plan axial.

Ce sont les alternateurs de cette catégorie qui sont les plus répandus;

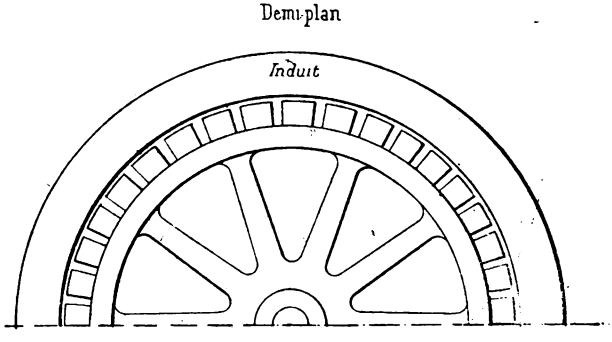


Fig. 186. — Alternateur vertical « à parapluie » Brown-Boveri. Vue en plan.

2° *Les alternateurs dits « à parapluie »*. — Cette forme d'alter-

nateur, qui ressemble à un parapluie ouvert (fig. 185 et 186), a été imaginée par la Maison Brown-Boveri.

Les bras de la roue polaire se dirigent vers l'extrémité supérieure de l'arbre comme les baleines d'un parapluie, de façon à dégager la partie de l'arbre située dans le plan des pôles, et à permettre de placer à cet endroit un palier P_1.

Ce palier P_1, qui est relié à la carcasse de l'induit, étant dans le plan des attractions magnétiques agissant sur la roue polaire, se trouve donc placé dans les meilleures conditions pour résister à la résultante de ces attractions, si celle-ci n'est pas nulle.

Un second palier P_2, également relié à la carcasse de l'induit,

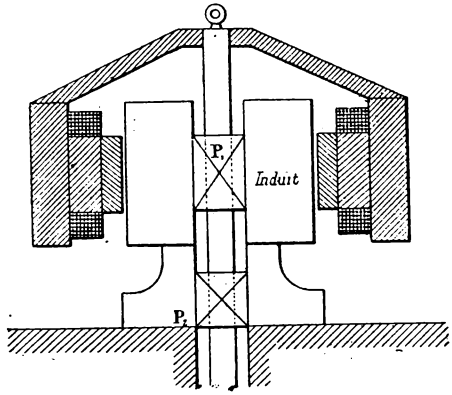


Fig. 187. — Alternateur vertical « à cloche » Westinghouse. Type du Niagara.

sert à guider l'arbre sur une longueur suffisante pour empêcher toute oscillation d'un bout d'arbre en porte-à-faux.

Dans les derniers alternateurs de ce type, comme par exemple ceux de l'usine de Beznau, il n'existe qu'un seul palier P_1 mais très largement prévu.

Parmi les alternateurs de cette forme installés par MM. Brown-Boveri, on peut citer ceux des usines de Jonage (près Lyon), de Bellegarde, de Chèvres à Genève, de Beznau sur l'Aar, etc.;

3° *Les alternateurs dits « à cloche »*. — Ce type, créé par les ateliers d'Oerlikon, a été surtout rendu célèbre par les alternateurs de l'usine du Niagara (fig. 187).

Dans ces alternateurs, qui ont été construits par la Société Westinghouse, pour absorber chacun 5.000 chevaux, l'inducteur est formé d'un immense anneau en acier au nickel entourant l'induit.

Les noyaux polaires sont boulonnés à l'intérieur de cet anneau, qui est suspendu à la partie supérieure de l'arbre par un bâti en forme de cloche.

En P_1 et P_2 se trouvent deux paliers. Ce type d'alternateur avait pour principal avantage de posséder un grand moment d'inertie.

PLANCHES

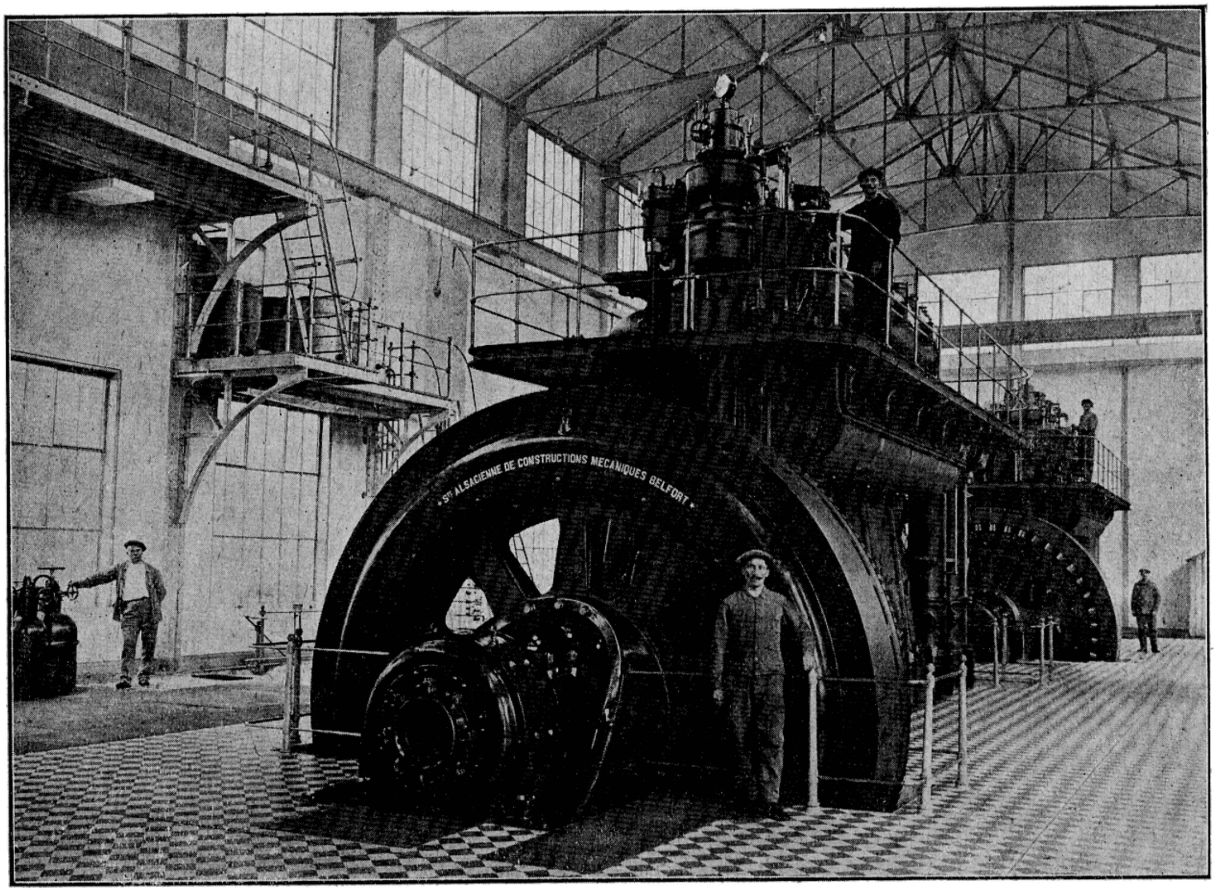


PLANCHE I. — Alternateurs triphasés à pôles extérieurs de 1.400 kilowatts, 2.500 volts, 136 tours, 50 périodes, de la *Société Alsacienne de Constructions mécaniques*, à Belfort, actionnés par des moteurs Diesel, installés dans la Station Centrale de la Compagnie du Gaz de Calais.

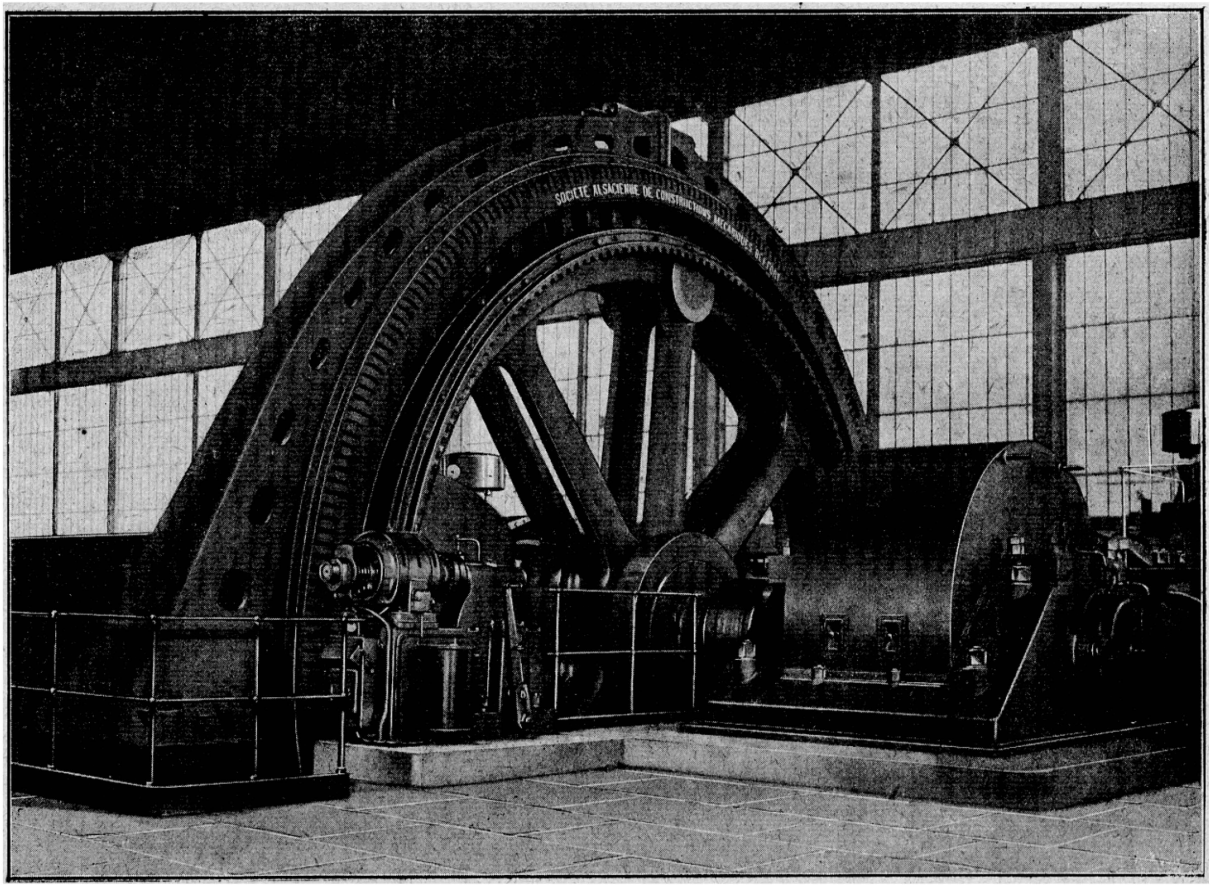


Planche II. — Alternateur volant à courant triphasé 15.000 K. W., 1.000 tours-minute, construit par la *Société Alsacienne de Constructions mécaniques*, à Belfort, installé dans la Station Centrale de la Société Normande de Métallurgie à Caen. Cet alternateur est calé sur l'arbre d'un moteur à gaz construit par la *Société Alsacienne*.

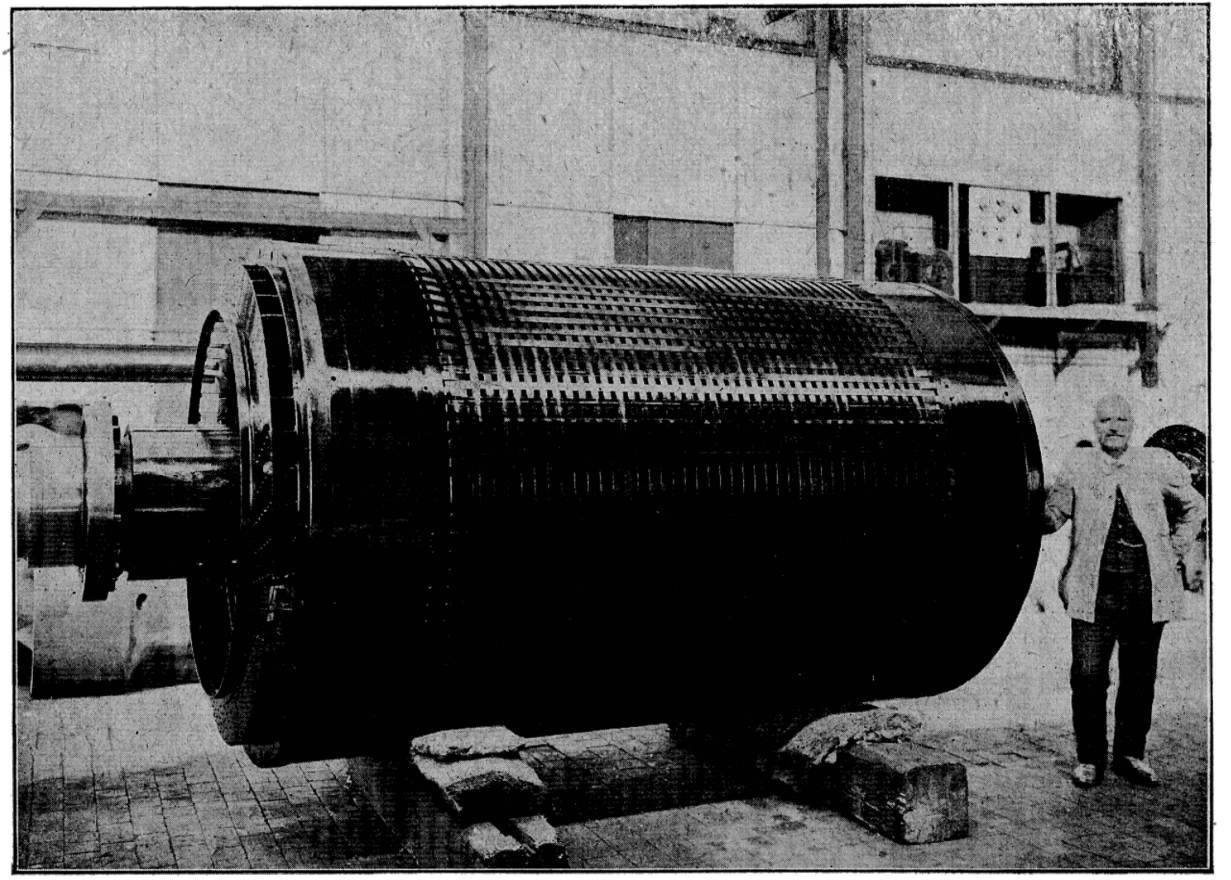


PLANCHE III. — Rotor d'une Génératrice de 5.800 K. V. A., 94 tours, 5.200 volts, 50 périodes par la *Compagnie Electro-Mécanique.*

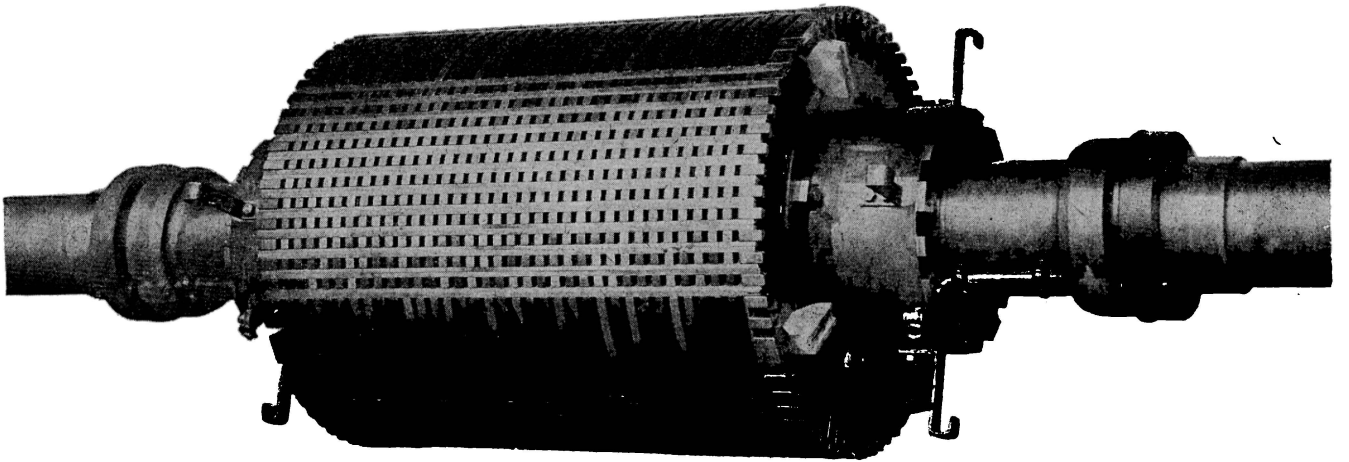


PLANCHE IV. — Rotor d'un turbo-générateur tétrapolaire sans enroulement, construit par la *Compagnie Electro-Mécanique.*

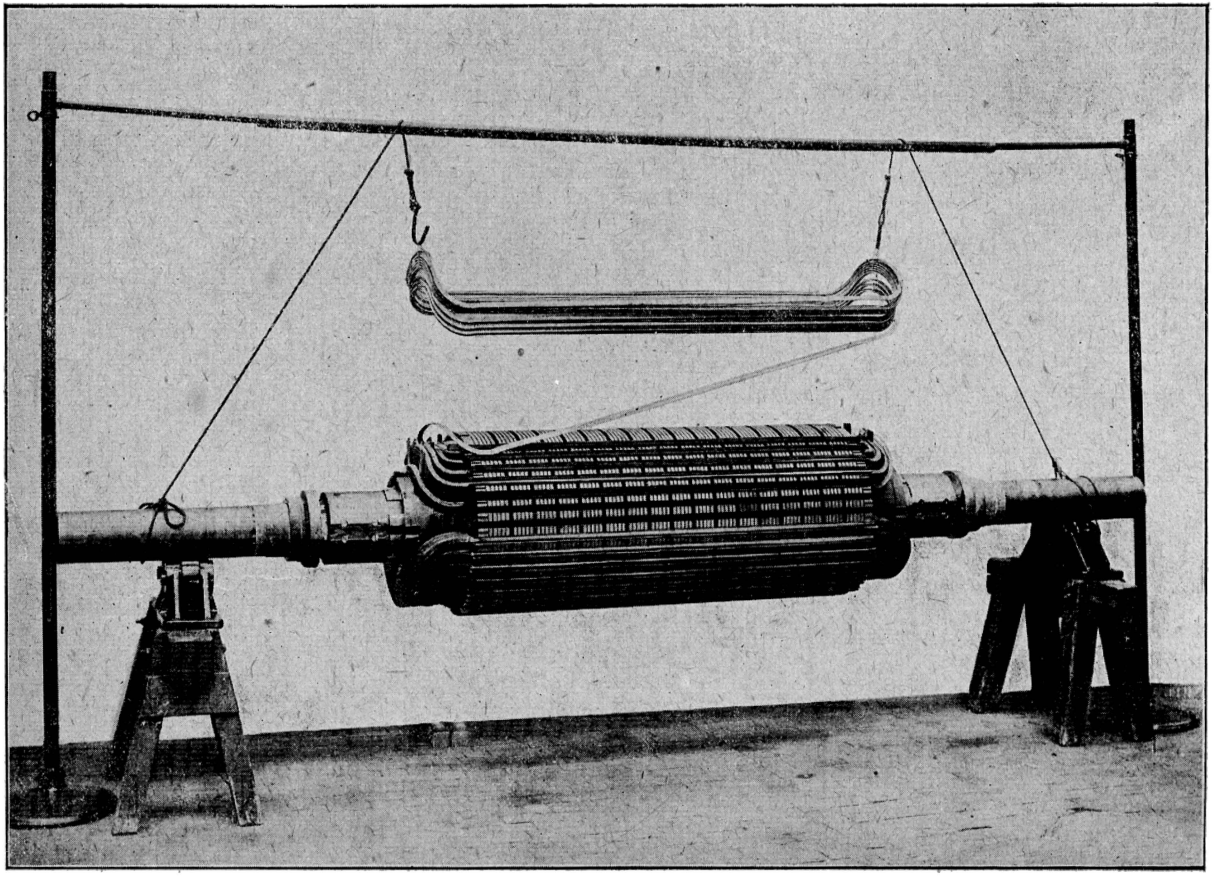


PLANCHE V. — Rotor d'une génératrice 3.000 tours, pendant la mise en place de l'enroulement, de la *Compagnie Electro-Mécanique.*

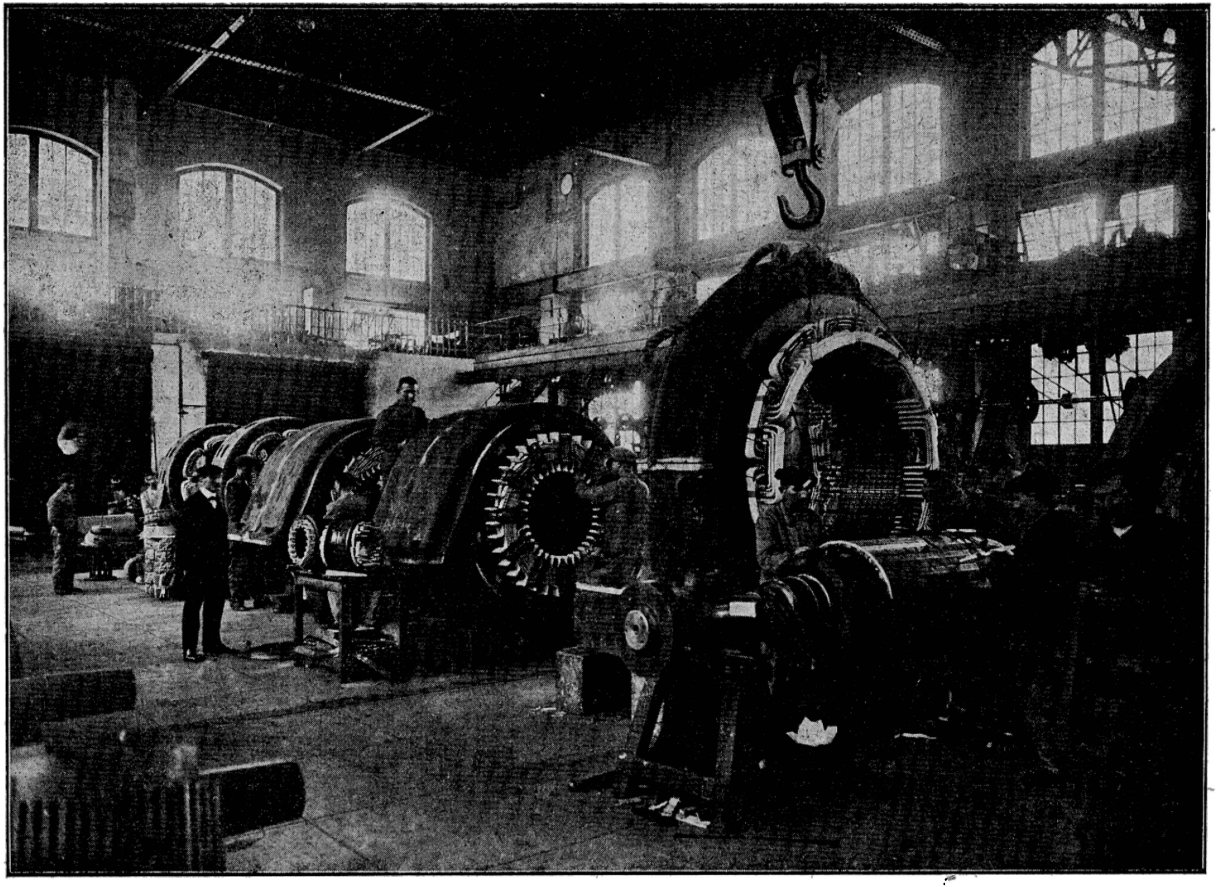


PLANCHE VI. — Atelier de bobinage d'alternateurs et de turbo-alternateurs des *Usines Schneider & C^ie^*, de Champagne-sur-Seine.

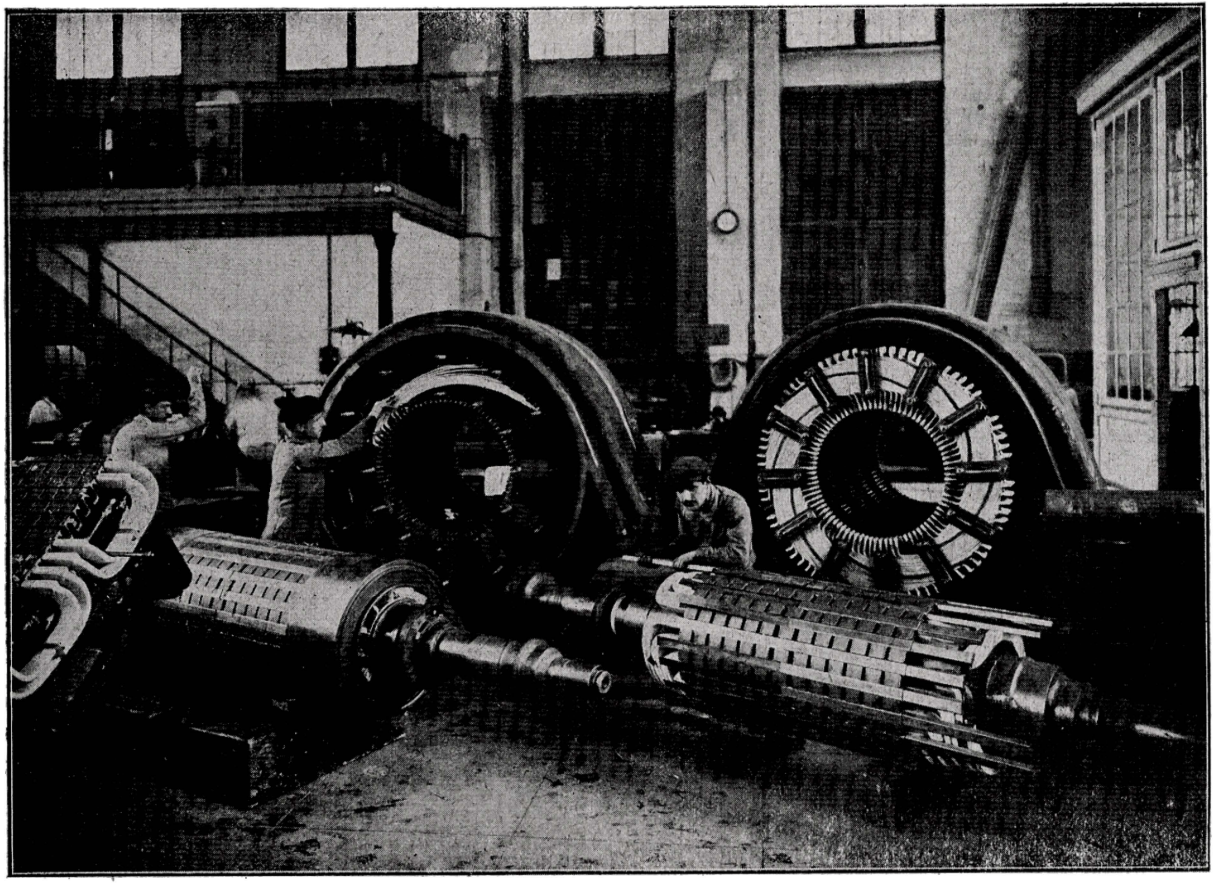


PLANCHE VII. — Bobinage des rotors et stators de turbo-alternateurs aux *Usines Schneider & C^ie^*, de Champagne-sur-Seine.

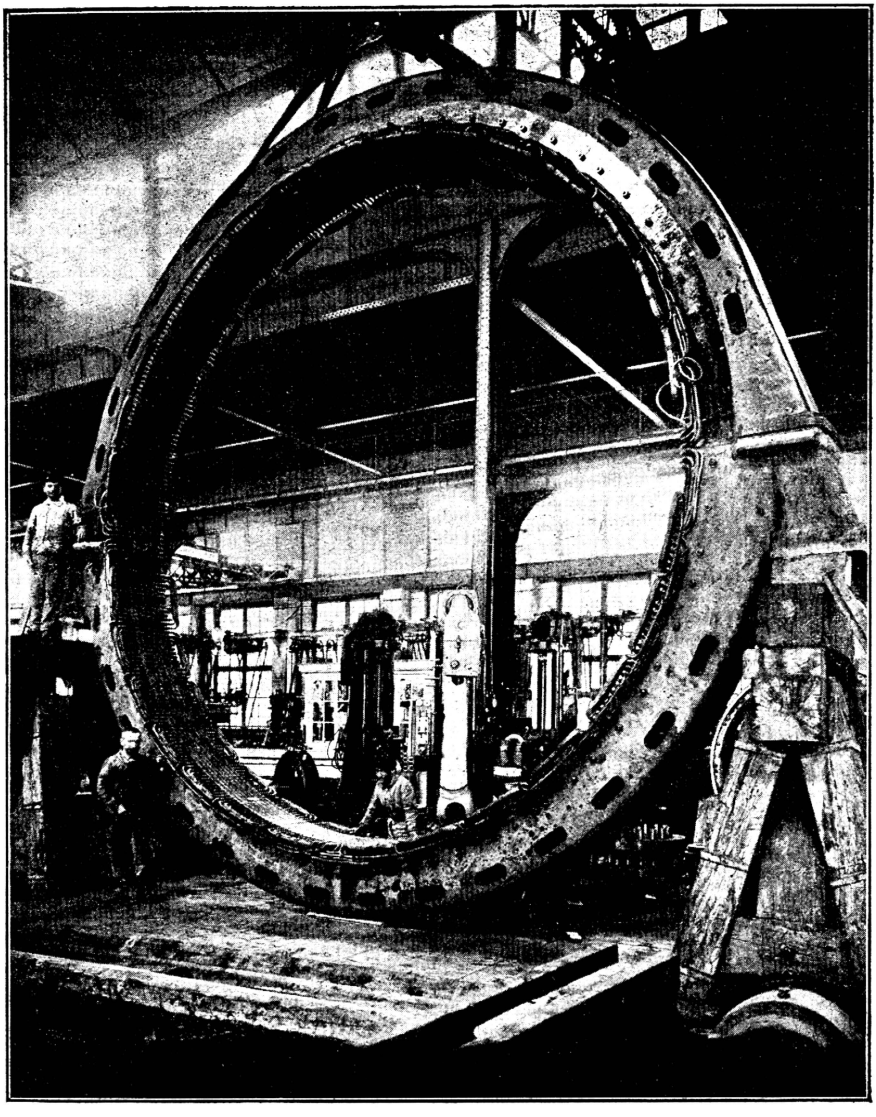
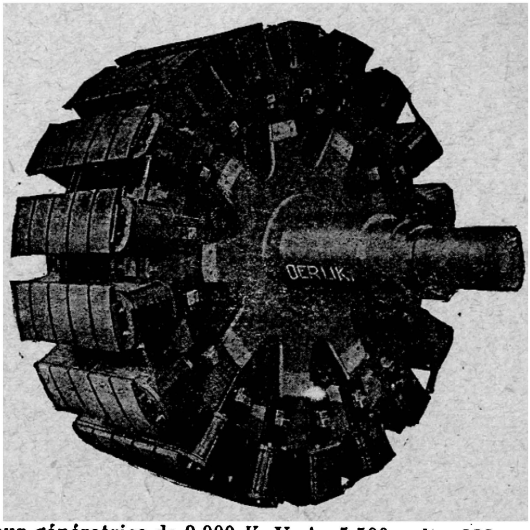
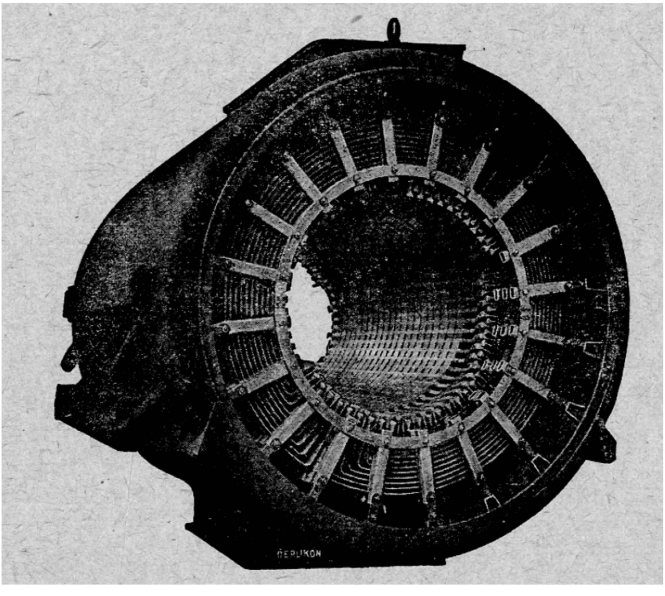


PLANCHE VIII. — Stator d'alternateur de 1.875 K. V. A., 72 tours-minute, construit par les Usines *Schneider & C^ie^*, de Champagne-sur-Seine, pour la *Compagnie du Chemin de fer Métropolitain de Paris.*

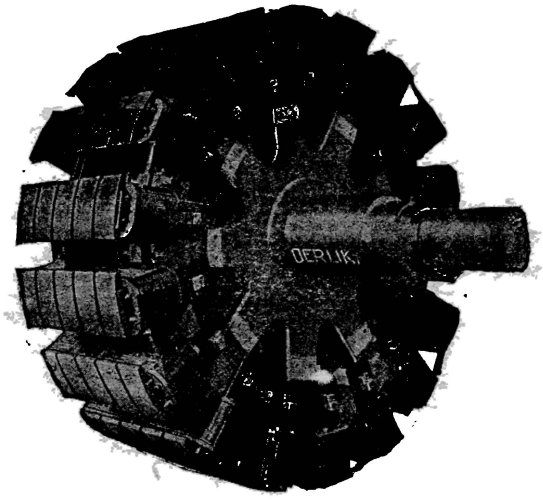


Roue polaire pour génératrice de 9.000 K. V. A., 5.500 volts, 333 tours, 50 périodes. courant triphasé, construit par *Ateliers de Construction*, de Oerlikon.

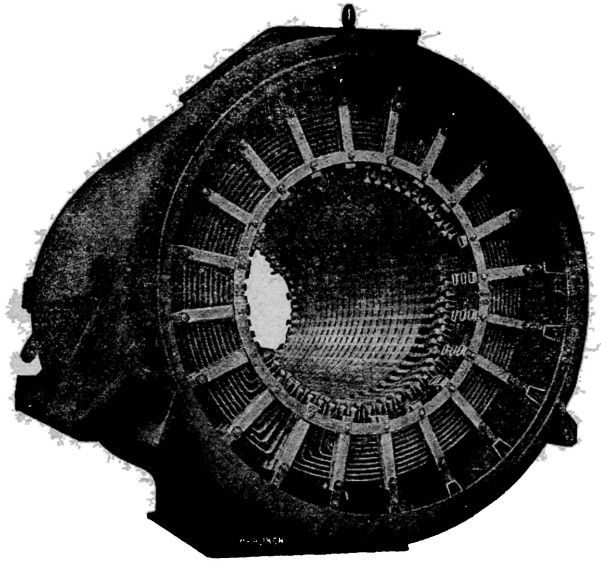


Stator d'un alternateur de 11.000 K. V. A., 25 ∞, 6.500 volts, 1.500 tours-minute. construit pour la Centrale Electrique de Stockholm, par *Ateliers de Construction*, de Oerlikon.

PLANCHE IX.



Roue polaire pour génératrice de 9.000 K. V. A., 5.500 volts, 333 tours, 50 périodes. courant triphasé, construit par *Ateliers de Construction*, de Oerlikon.



Stator d'un alternateur de 11.000 K. V. A., 25 ∞, 6.500 volts, 1.500 tours-minute. construit pour la Centrale Electrique de Stockholm, par *Ateliers de Construction*, de Oerlikon.

PLANCHE IX.

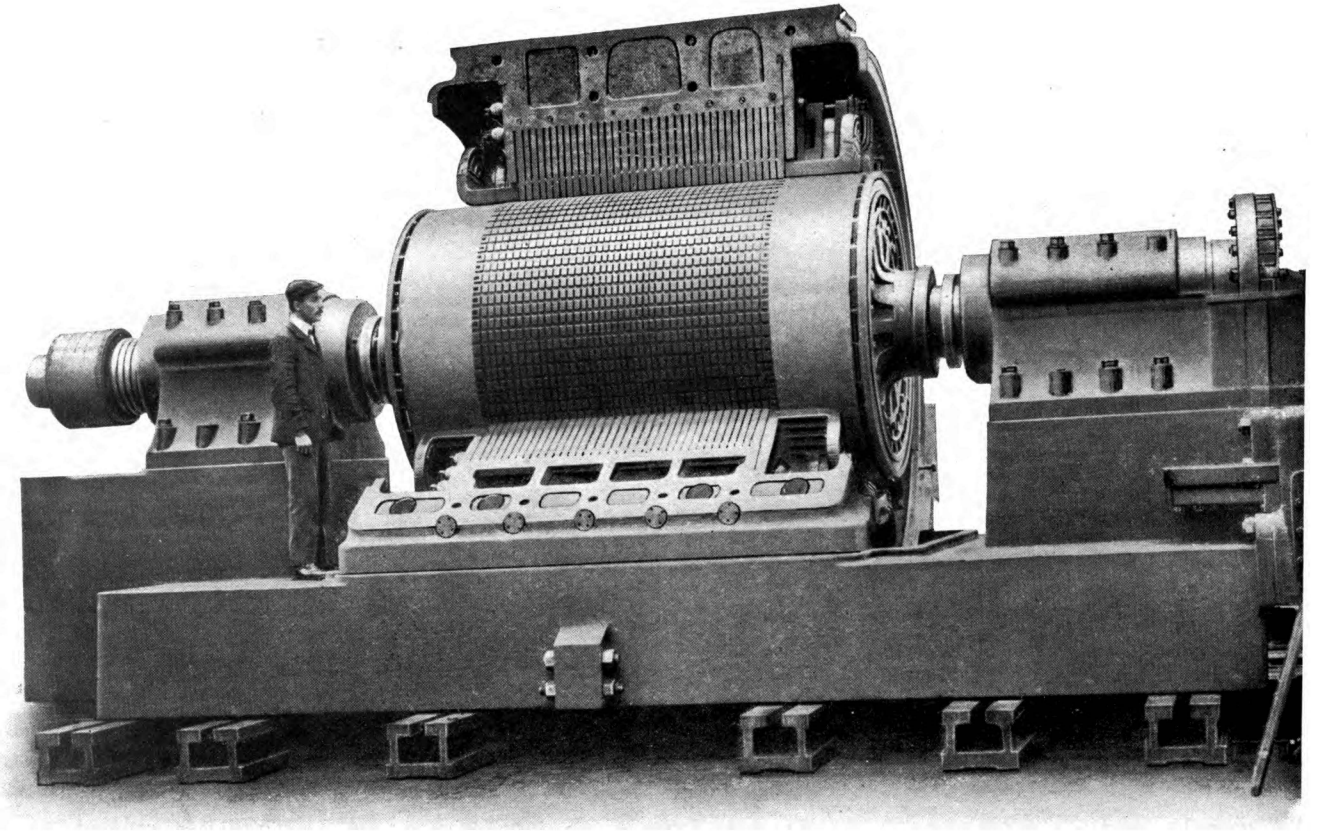
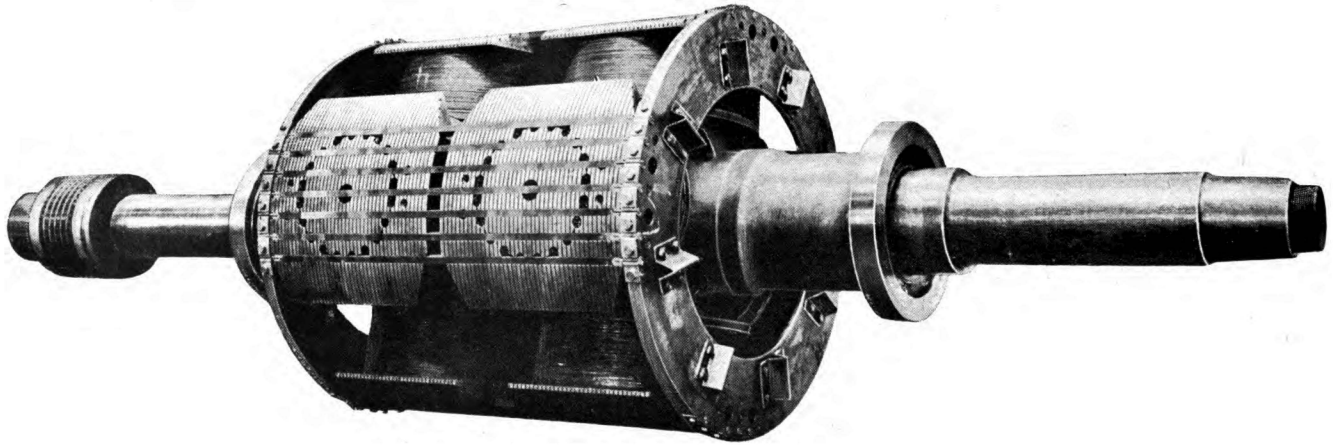
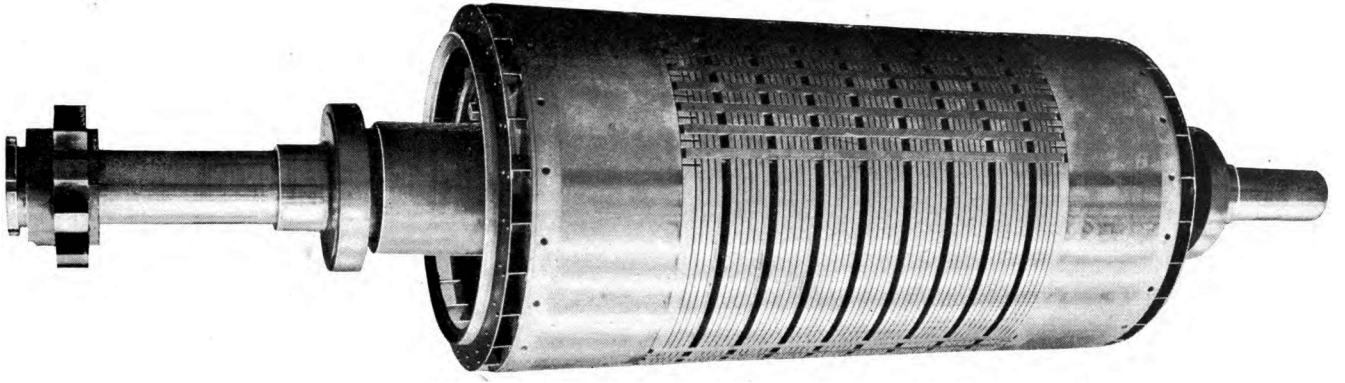


PLANCHE X. — Turbo-alternateur biphasé en montage, 7100 KVA, 12.500 volts, 833,3 tours, 42 périodes, de la *Société Alsacienne de Constructions mécaniques*. Deux machines semblables sont en fonctionnement dans la Station Centrale de la Société Anonyme « Le Triphasé » à Asnières.



Rotor d'un alternateur monophasé de 4.500 K. V. A. 2.000 volts, 1.275 tours, 42.5 périodes, de la *Compagnie Electro mécanique.* Pôles saillants.



Rotor d'un turbo-alternateur triphasé de 4.500 K. V. A. 8.000 volts, 2.520 tours, 42 périodes, de la *Compagnie Electro mécanique.* Pôles non saillants.

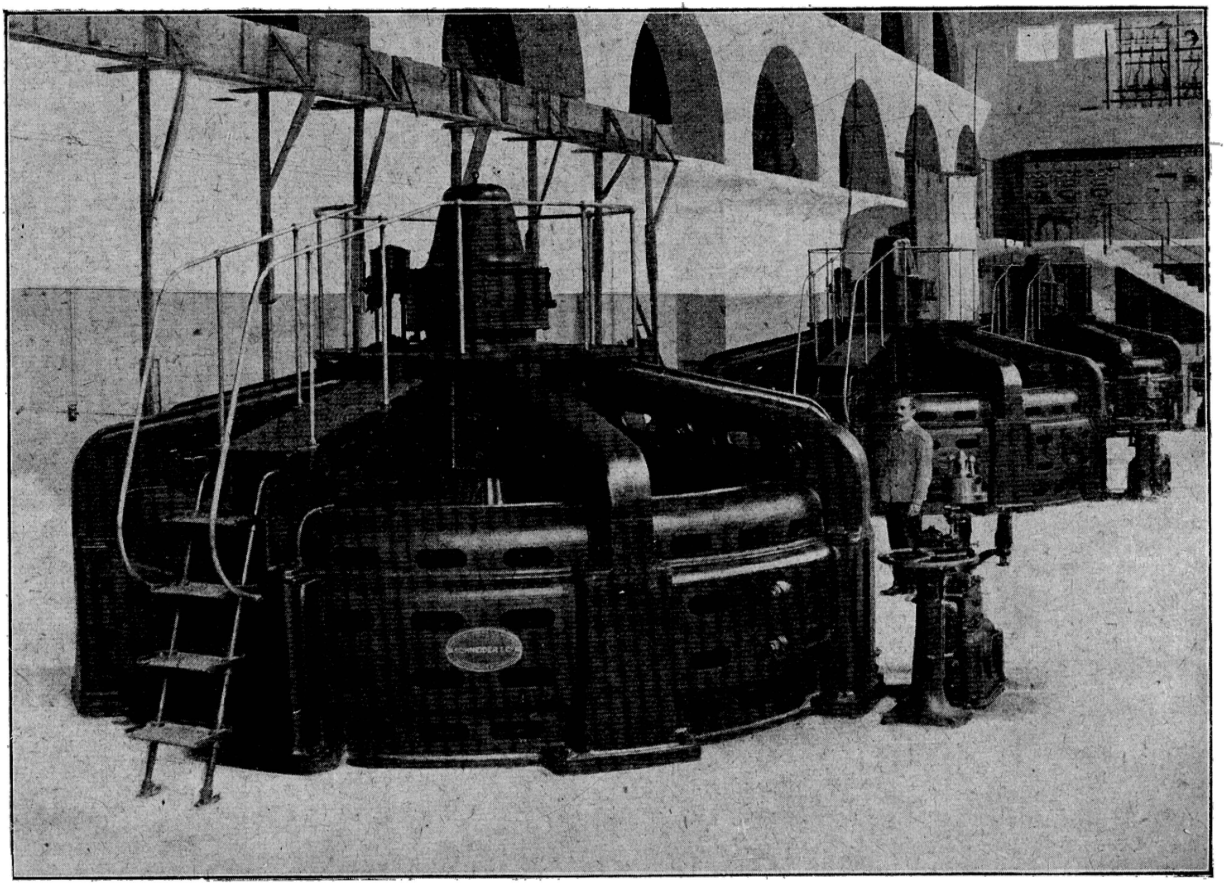


PLANCHE XII. — Alternateurs de 3.450 K. V., 150 tours-minute, construit par la *Société Schneider & C^ie^ :* Station Centrale de la *Société d'Entreprises d'Exploitations,* à Bellegarde (Rhône).

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE..... 7

CHAPITRE PREMIER

Classification et étude des anciens types d'alternateurs.... 11

CLASSIFICATION SUIVANT LA NATURE DE L'INDUIT..... 12

I. Induit à disque..... 12

Alternateur Ferranti..... 13
Alternateur volant Ferranti-Patin..... 14
Alternateur Morday..... 14
Avantages et inconvénients des induits à disque..... 15

II. Induits à anneau..... 15

Avantages et inconvénients des induits à anneau..... 17

III. Induits en tambour..... 18

Alternateur Ganz-Zypernordsky à induit polaire..... 18
Avantage prineipal de cet alternateur..... 19
Inconvénients principaux..... 19
Enroulement en tambour à courant continu, utilisé pour les alternateurs de faible puissance..... 20

CLASSIFICATION SUIVANT LA NATURE DE L'INDUCTEUR..... 20

I. Alternateurs homopolaires..... 20

1° *Types à une seule bobine d'excitation*..... 20
2° *Alternateurs homopolaires possédant plusieurs bobines d'excitation*..... 25

II. Alternateurs hétéropolaires..... 26

1° *Une seule bobine d'excitation*..... 26
2° *Alternateurs hétéropolaires à plusieurs bobines d'excitation*..... 27
Comparaison entre les alternateurs homopolaires et hétéropolaires..... 28
Avantages et inconvénients d'une bobine unique d'excitation..... 30
Avantages et inconvénients des alternateurs à fer tournant. 31
Avantages présentés par le choix d'un induit fixe et d'un inducteur mobile..... 31

CHAPITRE II

Construction des alternateurs modernes..... 34

GÉNÉRALITÉS, ETUDE DÉTAILLÉE DE L'INDUIT. ENROULEMENTS PRATIQUEMENT EMPLOYÉS..... 34

Dispositions communes à tous les alternateurs modernes. 34
Points principaux qui permettent encore de différencier les alternateurs des divers constructeurs..... 34

CLASSIFICATION DES ALTERNATEURS MODERNES..... 35

I. Suivant la vitesse..... 35

a) *Alternateurs à vitesse angulaire lente ou alternateurs volants*..... 35
b) *Alternateurs à vitesse angulaire moyenne*..... 36
c) *Alternateurs à très grande vitesse angulaire*..... 36

II. Suivant la destination des alternateurs..... 36

Alternateurs pour l'électrochimie..... 36

Alternateurs pour transport d'énergie et distribution d'éclairage 36

III. Suivant la tension 36

IV. Suivant la fréquence 37

V. Suivant le nombre de phases 37

VI. Suivant la position de l'arbre 37

DIMENSIONS DES ALTERNATEURS 37

Influence de la puissance sur les dimensions des alternateurs pour une même vitesse angulaire 39
Influence de la vitesse angulaire sur les dimensions des alternateurs pour une même puissance 39

VITESSES ANGULAIRES DES ALTERNATEURS 40

MATÉRIAUX EMPLOYÉS EN CONSTRUCTION ÉLECTROMÉCANIQUE .. 41

Caractères des fers, fontes, aciers employés 42
Emploi des fers, fontes, aciers 42
Induction dans les dents 44

ETUDE DÉTAILLÉE DE L'INDUIT 46

I. Carcasse au bâti de l'induit 46

Plaque de fondation 49

II. Tôles de l'induit 49

Calcul des pertes par hystérésis 52
Importance du recuit des tôles pour diminuer l'hystérésis. 52
Vieillissement des tôles 53
Dimensions et épaisseur des tôles 53
Isolement des tôles 53
Calcul des pertes par courants de Foucault 54
Découpage et poinçonnage des tôles 55
Disposition des tôles de l'induit. — Production d'une force électromotrice dans l'arbre avec les induits en plusieurs parties 56

Fixation et serrage des tôles 59
Courants de Foucault dans les boulons de serrage des tôles. Moyens employés pour les éviter 63
Pertes de courants de Foucault dans les boulons de serrage des tôles 65
Calcul des pertes dans les boulons non isolés 66
Détermination industrielle des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans un échantillon de tôle 68
Echauffement des tôles 70
Induits lisses, induits dentés 71
Forme des encoches 72
Nombre d'encoches par pôle 75
Nombre d'encoches par pôle ordinairement adopté 76

ENROULEMENTS EMPLOYÉS PRATIQUEMENT POUR L'INDUIT 77

I. Enroulements avec bobines séparées 78

Alternateurs diphasés 80
Alternateurs triphasés 82

II. Enroulements avec bobines enchevêtrées 84

III. Enroulements avec barres 86

1° *Enroulements imbriqués* 88
2° *Enroulements ondulés* 89
Couplage en série ou en parallèle des enroulements 90
Montage en étoile ou en triangle des alternateurs triphasés. 91

BOBINAGE DE L'INDUIT 93

Isolation des conducteurs par rapport à la masse 96
Bobinage des induits à haute tension 96
Bobinage des induits à basse tension 99

MÉTAUX EMPLOYÉS POUR LA CONSTRUCTION ÉLECTROMÉCANIQUE. 100

1. Cuivre 100

Dimensions maxima des conducteurs massifs 101
Avantages des conducteurs carrés ou rectangulaires 101
Câbles 102
Isolation des conducteurs 102

Alliages usuels du cuivre 102
Laiton. Laiton français 1er titre 103
Laiton français 2e titre 103
Laiton fondu 103
Bronze 104

CHAPITRE III

Construction des alternateurs modernes (*suite*) 105

ETUDE DÉTAILLÉE DE L'INDUCTEUR 105

ARBRE 106

Influence de l'attraction magnétique 106
Exemple de calcul de l'attraction magnétique 107
Équilibrage dynamique de l'inducteur 108
Calcul à la torsion seule 109
Calcul à la flexion seule 110
Réaction de la courroie sur l'arbre 113
Arbres pour très grandes vitesses 115
Action gyrostatique 116
Calcul des efforts agissant sur les coussinets 117
Tourillons 117
Forme de l'arbre 120
Coussinets-paliers 121
Coussinets 121
Mode de fixation des coussinets dans les paliers 122
Echauffement des coussinets 124
Paliers 124
Chaise support du palier 124

ROUE POLAIRE 125

NOYAUX POLAIRES 126

Pôles massifs 126
Inconvénients des pôles massifs 126
Pôles feuilletés 126
Dimensions des noyaux polaires 127
Efforts agissant sur les noyaux polaires 127

Calcul de la force centrifuge s'exerçant sur les noyaux polaires ... 128
Calcul de l'attraction magnétique des pôles inducteurs ... 129
Résultante des attractions magnétiques et causes de cette résultante ... 130
Calcul de la résultante des attractions magnétiques ... 131
Formule générale. Application ... 135
Effets de la résultante des attractions magnétiques ... 136
A. *Inducteurs fixes;* B. *Inducteurs tournants* ... 136
La résultante est due à un défaut dans le pôle ... 137
Fixation des noyaux à la jante et à la zone polaire ... 137

PIÈCES POLAIRES OU ÉPANOUISSEMENTS POLAIRES ... 140

Fixation des pièces polaires sur les noyaux polaires ... 142
Ecartements des noyaux polaires ... 142

BOBINES INDUCTRICES ... 143

Amortisseurs Leblanc ... 146
Bagues amenant le courant à l'inducteur ... 147

CHAPITRE IV

Etude des différents types d'alternateurs modernes ... 148

ALTERNATEURS SPÉCIAUX ... 148

Alternateurs à faible vitesse angulaire ou alternateurs volants ... 148
Alternateurs volants avec inducteurs tournants extérieurs à l'induit ... 150
Carcasse de l'induit dans le cas des alternateurs volants ... 151
Emploi de tirants ou fer pour donner de la rigidité à la carcasse ... 151
Centrage de l'induit ... 152
Alternateurs à grande vitesse. Turbo-alternateurs ... 154
Causes principales des difficultés rencontrées dans la construction des turbo-alternateurs ... 154
Construction des turbo-alternateurs ... 159
Inducteurs à pôles non saillants ... 159

Turbo-alternateurs de la Société d'Electricité A.E.G. 162
Inducteurs à pôles saillants 163
Construction des alternateurs suivant leur destination (*électrochimie ou transport d'énergie, d'éclairage*) 169
Avantage des alternateurs à faible chute de tension pour le transport de force et d'éclairage 165
Inconvénients des alternateurs à faible chute de tension pour le transport de force et d'éclairage 166
Construction des alternateurs suivant la chute de tension à obtenir 166
Construction des alternateurs suivant le nombre des phases 169
Comparaison entre les alternateurs triphasés et monophasés au point de vue du poids, du prix et du rendement 170

ALTERNATEURS A ARBRE VERTICAL 170

Planches hors texte 175

Pl. 1. — Alternateurs triphasés à pôles extérieurs de 1.400 kilowatts 177
2. — Alternateur volant à courant triphasé de 5.800 K.V.A. 179
3. — Rotor d'une génératrice de 1.500 K.V.A. 181
4. — Rotor d'un turbo-générateur tétrapolaire sans enroulement 183
5. — Rotor d'une génératrice de 3.000 tours, pendant la mise en place de l'enroulement 185
3. — Atelier de bobinage d'alternateurs et de turbo-alternateurs 187
7. — Bobinage de rotors et stators de turbo-alternateurs .. 189
8. — Stator d'alternateur de 1.875 K.V.A. 191
9. — Roue polaire pour génératrice de 9.000 K.V.A. 193
Stator d'un alternateur de 11.000 K.V.A. 193
10. — Turbo-alternateur biphasé en montage 195
11. — Rotor d'un alternateur monophasé de 4.500 K.V.A. (Pôles saillants) 199
Rotor d'un turbo-alternateur triphasé de 2.500 K.V.A. (Pôles non saillants) 197
12. — Alternateurs de 3.450 K.V.A. 199

Association Linotypiste, 23, rue Turgot, Paris (9e).

En vente à la Librairie Albin MICHEL, Éditeur, 22, rue Huyghens, Pa

B.I.E. Bibliothèque de l'Ingénieur Electricien B.I.E.

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DE

L. BARBILLION

Professeur à l'Université de Grenoble, Directeur de l'Institut Electrotechnique

Mesures électriques, par L. BARBILLION, L. JOLLAND et A. LAFONT, *Directeur et Professeurs de l'Institut Electrotechnique de Grenoble :*
1re PARTIE, 1 vol. in-8 de 265 pages avec 133 figures.. **15**
2e PARTIE, 1 vol. in-8 de 228 pages avec 146 figures.. **15**

Les Alternateurs industriels, par L. BARBILLION et H. ANTOINE, *Directeur et Chargé de Conférences à l'Institut Electrotechnique de Grenoble,* 1 vol. in-8 de 212 pages avec 146 figures..... **15**

Lignes électriques aériennes, par P. BERGEON et A. CASTEX, *Professeurs à l'Institut Electrotechnique de Grenoble,* avec la collaboration de L. BARBILLION; 1 vol. in-8 de 240 pages, avec 98 figures et une grande planche repliée..... **15**

Lignes électriques souterraines, par L. BARBILLION et A. COIGNARD, *Directeur et Professeur de l'Institut Electrotechnique,* 1 vol. in-8 de 188 pages avec 67 figures et 4 pl. h. t..... **15**

Essais de machines et d'appareils électriques, par L. BARBILLION, L. JOLLAND et A. LAFONT, *Directeur et Professeurs de l'Institut Electrotechnique de Grenoble :*
1re PARTIE : *Courant continu,* 1 vol. in-8 de 268 pages avec 209 figures..... **15**

Les Machines électriques alternatives à collecteurs, par L. BARBILLION, *Professeur à l'Université de Grenoble, Directeur de l'Institut Electrotechnique,* 1 vol. in-8 de 256 pages, avec 164 figures..... **15**

Eclairage électrique, par L. BARBILLION et P. BERGEON, *Directeur et Sous-Directeur de l'Institut Electrotechnique de Grenoble,* 1 vol. in-8 de 152 pages avec 87 figures..... **15**

Moteurs synchrones et Convertisseurs rotatifs, par L. BARBILLION, *Professeur à l'Université de Grenoble, Directeur de l'Institut Electrotechnique,* 1 vol. in-8 de 256 pages avec 197 figures..... **15**

Construction des alternateurs, par L. BARBILLION et P. BERGEON, *Directeur et Sous-Directeur de l'Institut Electrotechnique de Grenoble,* 1 vol. in-8 de 208 pages avec 187 figures et 12 planches hors texte..... **15**

SOUS PRESSE :

Essais de Machines et d'Appareils électriques : *Deuxième Partie :* **Courant alternatif. — Moteurs asynchrones. Transformateurs statiques. — Traction à courant continu. — Machines dynamos spéciales. — Généralités sur les courants alternatifs. — Machines dynamos à courant continu.**